



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY**

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

**KONTROLA PARAMETRŮ STYKAČE NN VÝPOČTEM A  
MĚŘENÍM**

CONTROL OF LOW VOLTAGE CONTACTOR BY CALCULATION AND MEASUREMENT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Matěj Veselý**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.**

**BRNO 2020**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Matěj Veselý

**ID:** 195648

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Kontrola parametrů stykače nn výpočtem a měřením

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se s požadavky kladenými na stykače nn.
2. Vypočítejte elektrodynamické síly působící na pohyblivý kontakt stykače.
3. Navrhněte pohybový mechanismus a stanovte přítláčnou sílu na kontaktní můstek.
4. Vypočítejte a měřením ověřte oteplení proudovodné dráhy stykače.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] HAVELKA, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, Praha 1985.
- [2] HAVELKA, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování el. přístrojů, skriptum VUT Brno
- [3] Havelka, O.: Stavba elektrických přístrojů I. Skriptum VUT Brno.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 10.6.2020

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá kontrolou parametrů stykače nízkého napětí výpočtem a měřením. Konkrétněji se zabývá výpočtem působících elektrodynamických sil na pohyblivý kontakt stykače, stanovení minimální přitlačné síly na pohyblivý kontakt stykače a návrh vypínacího systému stykače. Dále se zabývá výpočtem oteplení proudovodné dráhy stykače a jeho následné ověření měřením.

## **Klíčová slova**

Stykač, elektrodynamická síla, pružina, elektromagnet, cívka, měření, oteplení proudovodné dráhy

## **Abstract**

The bachelor project deals with controlling mean parameters of low voltage contactor by calculation and measurement. Deals more specifically with calculation of the applied electrodynamic forces on the contactor's movable contact, the determination of the minimum compressive force on the contactor's movable contact and the design of the contactor trip system. It also deals with calculation of heating of the current-carrying path on contactor and its following check by measuring.

## **Keywords**

Contactor, electrodynamic force, spring, electromagnet, coil, measurement, heating of the current-carrying path

## **Bibliografická citace:**

VESELÝ, Matěj. *Kontrola parametrů stykače nn výpočtem a měřením* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125775>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Bohuslav Bušov.

## Prohlášení

*„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma **Kontrola parametrů stykače nn** výpočtem a měřením jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.*

*Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.*

V Brně dne: **10. června 2020**

.....

podpis autora

## Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Bohuslavu Bušovovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **10. června 2020**

.....

podpis autora

# Obsah

|   |    |
|---|----|
| Úvod.....   | 10 |
| 1 Vlastnosti stykače.....   | 11 |
| 1.1 Kategorie užití.....  | 11 |
| 1.2 Izolační vzdálenosti.....   | 12 |
| 2 Parametry stykače .....   | 13 |
| 2.1 Izolace .....   | 13 |
| 2.2 Rozměry proudovodné dráhy .....   | 14 |
| 3 Výpočet elektrodynamických sil působících na pohyblivý kontakt stykače .....    | 15 |
| 3.1 Výpočet působící síly od úseku č.1 .....                                      | 15 |
| 3.2 Výpočet působící síly od úseku č.2.....                                       | 16 |
| 3.3 Výpočet působící síly od úseku č.3 .....                                      | 16 |
| 3.4 Výpočet působící síly od úseku č.4.....                                       | 17 |
| 3.5 Výpočet působící síly v kontaktní úžině .....                                 | 17 |
| 3.6 Výpočet působící síly na můstek s přilehlými úseky kontaktních destiček ..... | 19 |
| 3.7 Balance elektrodynamických sil působících na kontaktní můstek .....           | 20 |
| 4 Návrh pružin.....   | 21 |
| 4.1 Přítlačná pružina.....  | 21 |
| 4.2 Vypínací pružiny .....  | 23 |
| 5 Elektromagnet .....   | 25 |
| 5.1 Průběh pasivních odporů.....  | 25 |
| 5.2 Tah elektromagnetu.....   | 26 |
| 5.3 Železné jádro a vinutí.....   | 29 |
| 6 Oteplení jmenovitým proudem .....   | 32 |
| 6.1 Odpor proudovodné dráhy .....   | 32 |
| 6.1.1 Výpočet odporu šroubového spoje .....                                       | 32 |
| 6.1.2 Výpočet odporu úseku č.1 .....  | 33 |
| 6.1.3 Výpočet odporu úseku č.2 .....  | 33 |
| 6.1.4 Výpočet odporu úseku č.3 .....  | 34 |
| 6.1.5 Výpočet odporu úseku č.4 .....  | 34 |
| 6.1.6 Výpočet odporu úseku č.5 .....  | 34 |
| 6.1.7 Výpočet odporu kontaktního styku.....                                       | 35 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 6.1.8 | Výpočet odporu kontaktního můstku.....          | 35 |
| 6.2   | Náhradní schéma přívodu proudu .....            | 36 |
| 6.3   | Náhradní schéma svorkového spoje.....           | 39 |
| 6.4   | Náhradní schéma přívodního pásku .....          | 40 |
| 6.4.1 | První část přívodního pásku.....                | 41 |
| 6.4.2 | Druhá část přívodního pásku .....               | 42 |
| 6.5   | Náhradní schéma hlavního kontaktu .....         | 45 |
| 6.6   | Náhradní schéma kontaktního můstku .....        | 45 |
| 6.7   | Chladič – opalovací kontakt.....                | 50 |
| 6.8   | Jednořadové náhradní tepelné schéma .....       | 52 |
| 6.8.1 | Přepočet svorkového spoje .....                 | 54 |
| 6.8.2 | Přepočet prvního úseku proudovodné dráhy .....  | 54 |
| 6.8.3 | Přepočet chladiče .....                         | 55 |
| 6.8.4 | Přepočet druhého úseku proudovodné dráhy .....  | 55 |
| 6.8.5 | Přepočet hlavního kontaktu .....                | 56 |
| 6.8.6 | Přepočet kontaktního můstku.....                | 56 |
| 6.8.7 | Porovnání přepočtených hodnot .....             | 57 |
| 6.9   | Krátkodobé oteplení .....                       | 58 |
| 7     | Měření oteplení stykače .....                   | 61 |
| 7.1   | Měření oteplení stykače V 140 F .....           | 62 |
| 7.1.1 | Schéma zapojení .....                           | 63 |
| 7.1.2 | Postup měření .....                             | 63 |
| 7.1.3 | Tabulky naměřených a vypočtených hodnot .....   | 64 |
| 7.1.4 | Průběh oteplení .....                           | 66 |
| 7.1.5 | Závěr měření .....                              | 66 |
| 7.1.6 | Obrazová dokumentace.....                       | 67 |
| 8     | Porovnání vypočtených a naměřených hodnot ..... | 69 |
| 9     | Závěr .....                                     | 71 |

## Seznam obrázků

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 2-1 - Izolační vzdálenost .....   | 13 |
| Obrázek 2-2 - Rozměry proudovodné dráhy .....   | 14 |
| Obrázek 3-1 - Úseky proudovodné dráhy .....   | 15 |
| Obrázek 3-2 - Vzdálenost úseku č.1 od pohyblivého kontaktního můstku .....                      | 15 |
| Obrázek 3-3 - Vzdálenost úseku č.2 od pohyblivého kontaktního můstku .....                      | 16 |
| Obrázek 3-4 - Vzdálenost úseku č.3 od pohyblivého kontaktního můstku .....                      | 16 |
| Obrázek 3-5 - Vzdálenost úseku č.4 od pohyblivého kontaktního můstku .....                      | 17 |
| Obrázek 3-6 - Proudovodná úžina .....   | 18 |
| Obrázek 3-7 - U-záhyb .....   | 19 |
| Obrázek 4-1 - Pracovní diagram přitlačné pružiny .....  | 21 |
| Obrázek 4-2 - Pracovní diagram čtyř vypínacích pružin .....                                     | 23 |
| Obrázek 5-1 - Pracovní diagramy pružin .....  | 25 |
| Obrázek 5-2 - Diagram pracovních částí pružin (vypínací pružina, tíha, přitlačná pružina) ..... | 26 |
| Obrázek 5-3 - Jádru elektromagnetu .....  | 29 |
| Obrázek 5-4 - Řez cívkou .....  | 30 |
| Obrázek 6-1 - Rozdělení proudovodné dráhy .....   | 32 |
| Obrázek 6-2 - Rozměry úseku č.1 .....   | 33 |
| Obrázek 6-3 - Rozměry úseku č.2 .....   | 33 |
| Obrázek 6-4 - Rozměry úseku č.3 .....   | 34 |
| Obrázek 6-5 - Rozměry úseku č.4 .....   | 34 |
| Obrázek 6-6 - Rozměry úseku č.5 .....   | 35 |
| Obrázek 6-7 - Rozměry kontaktního můstku .....  | 36 |
| Obrázek 6-8 - Náhradní schéma přívodu proudu .....  | 39 |
| Obrázek 6-9 - Šroub v úseku č. 1 .....  | 39 |
| Obrázek 6-10 - Náhradní schéma šroubového spoje .....   | 40 |
| Obrázek 6-11 - Průřez stykačem .....  | 40 |
| Obrázek 6-12 - Náhradní schéma první části přívodního pásu .....                                | 42 |
| Obrázek 6-13 - Náhradní schéma druhé části přívodního pásu .....                                | 45 |
| Obrázek 6-14 - Náhradní schéma kontaktního spoje .....  | 45 |



|   |    |
|---|----|
| Obrázek 6-15 - Náhradní schéma kontaktního můstku.....                        | 46 |
| Obrázek 6-16 - Plochý kolmý jehlan .....                                      | 46 |
| Obrázek 6-17 - Zjednodušený kolmý jehlan.....                                 | 47 |
| Obrázek 6-18 - Náhradní schéma kontaktního můstku.....                        | 50 |
| Obrázek 6-19 - Rozměry chladiče .....   | 50 |
| Obrázek 6-20 - Náhradní schéma chladiče .....                                 | 52 |
| Obrázek 6-21 - Jednořadé tepelné schéma $\theta_{a1} = 50 \text{ K}$ .....    | 52 |
| Obrázek 6-22 - Jednořadé tepelné schéma $\theta_{b1} = 30 \text{ K}$ .....    | 53 |
| Obrázek 6-23 - Jednořadé tepelné schéma $\theta_{c1} = 34,34 \text{ K}$ ..... | 54 |
| Obrázek 6-24 – Jednořadé tepelné schéma - přepočtené .....                    | 58 |
| Obrázek 7-1 - Schéma zapojení silové a řídicí části .....                     | 63 |
| Obrázek 7-2 - Schéma zapojení termočlánků .....                               | 63 |
| Obrázek 7-3 - Umístění termočlánků.....                                       | 64 |
| Obrázek 7-4 - Měřicí pracoviště .....   | 67 |
| Obrázek 7-5 - Záběr z termokamery na měřicí pracoviště .....                  | 67 |
| Obrázek 7-6 - Záběr z termokamery na přívodní vodiče.....                     | 67 |
| Obrázek 7-7 - Záběr z termokamery na proudovodnou dráhu po vypnutí .....      | 68 |
| Obrázek 8-1 - Originální čelo stykače .....                                   | 70 |

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 1-1 - Kategorie spínání stykače [7].....                                     | 11 |
| Tabulka 1-2 - Podmínky pro jednotlivé třídy kategorie užití [7].....                 | 11 |
| Tabulka 1-3 - Izolační vzdálenosti [4] .....   | 12 |
| Tabulka 2-1 - Parametry stykače .....  | 13 |
| Tabulka 5-1 - Tahová charakteristika elektromagnetu .....                            | 27 |
| Tabulka 6-1 - Krajní přípustné zkratové proudy .....                                 | 59 |
| Tabulka 7-1 - Maximální dovolené oteplení částí přístroje při okolní teplotě [2].... | 61 |
| Tabulka 7-2 - Seznam použitých měřicích přístrojů a pomůcek .....                    | 62 |
| Tabulka 7-3 - Rozmístění termočlánků .....   | 64 |
| Tabulka 7-4 - Naměřené hodnoty teplot stykače .....                                  | 65 |
| Tabulka 7-5 - Vypočtené hodnoty oteplení stykače .....                               | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Tabulka 8-1 - Porovnání naměřených a vypočtených hodnot ..... | 69 |
|---|----|

## **Seznam grafů**

|   |    |
|---|----|
| Graf 1 - Tahová charakteristika elektromagnetu .....                      | 28 |
| Graf 2 - Krátkodobé zkratové zatížení.....                                | 60 |
| Graf 3 - Průběh oteplení poloviny proudovodné dráhy stykače V 140 F ..... | 66 |

# ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá kontrolou parametrů stykače nn výpočtem a měřením. Ověřovaný stykač V 140 F slouží jako pomůcka ve vyučování na Ústavu výkonové elektrotechniky Fakulty elektrotechnické a komunikačních technologií v Brně.

První část práce seznamuje s parametry a vlastnostmi, které jsou kladeny na stykače.

Dále se musí zjistit rozměry proudovodné dráhy, ze kterých se vypočítá působení elektrodynamických sil na kontaktní můstek ověřovaného stykače V 140 F a ze zjištěných působících elektrodynamických sil navrhuje vypínací mechanismus. Ten se skládá z pružin a elektromagnetu.

Další část práce se zabývá výpočtem oteplení proudovodné dráhy. Aby bylo možné vytvořit jednořadé tepelné schéma, musí se proudovodná dráha rozdělit na několik úseků. Z těchto úseků se vytvoří náhradní schémata jednotlivých částí proudovodné dráhy, ze kterých se následně složí jednořadé tepelné schéma. Z jednořadého tepelného schématu se vypočte výsledné oteplení proudovodné dráhy

Následující část se věnuje popisu a postupu měření oteplení ověřovaného stykače V 140 F. Tato část zahrnuje teoretický popis měření oteplovací zkoušky a zároveň vlastní měření zkoušky na stykači provedené v laboratořích FEKTu.

Poslední část práce porovnává naměřené a vypočtené hodnoty oteplení stykače V 140 F.

# 1 VLASTNOSTI STYKAČE

## 1.1 Kategorie užití

Stykače mohou pracovat v různých provozních podmínkách a použitích.

V tabulkách 1-1 a 1-2 jsou jen vybrané kategorie.[7]

**Tabulka 1-1 - Kategorie spínání stykače [7]**

| Kategorie | Použití  |
|-----------|--|
| AC-1      | Ohmická zátěž neinduktivní nebo slabě induktivní zátěže  |
| AC-2      | Motory s kotvou kroužkovou: spouštění, vypínání  |
| AC-3      | Spouštění motorů s klecovým rotorem, reverzace jen po vypnutí                                    |
| AC-4      | Spouštění motorů s klecovým rotorem, rychlé opakované spouštění, brždění protiproudem, reverzace |
| DC-1      | Ohmická zátěž neinduktivní nebo slabě induktivní zátěže  |
| DC-2      | Zapínání derivačních motorů, vypínání za chodu   |
| DC-3      | Zapínání derivačních motorů, zarážení, pojíždění   |

Stykače slouží k zapínání a rozepínání mnoha rozličných zátěží. Každá z těchto spínaných zátěží má rozdílné zapínací proudy. Tyto zapínací proudy musí podle normy ČSN EN 60947-4-1 být stykač schopen zapnout. V tabulce 1 jsou vybrané kategorie použití a jejich zapínací proudy.[4]

**Tabulka 1-2 - Podmínky pro jednotlivé třídy kategorie užití [7]**

| Kategorie<br>AC | Obvyklá funkce    |                |      |                   |                    |      | Příležitostná funkce                 |                   |      |                                     |                   |      |
|-----------------|-------------------|----------------|------|-------------------|--------------------|------|--------------------------------------|-------------------|------|-------------------------------------|-------------------|------|
|                 | Zapnutí           |                |      | Vypnutí           |                    |      | Zapnutí                              |                   |      | Vypnutí                             |                   |      |
|                 | I                 | U              | cos  | I                 | U <sub>r</sub>     | cos  | I                                    | U                 | cos  | I                                   | U <sub>r</sub>    | cos  |
| AC-1            | I <sub>n</sub>    | U <sub>n</sub> | 0,95 | I <sub>n</sub>    | U <sub>n</sub>     | 0,95 | -                                    | -                 | -    | -                                   | -                 | -    |
| AC-2            | 2,5I <sub>n</sub> | U <sub>n</sub> | 0,65 | 2,5I <sub>n</sub> | U <sub>n</sub>     | 0,65 | 4I <sub>n</sub>                      | 1,1U <sub>n</sub> | 0,65 | 4I <sub>n</sub>                     | 1,1U <sub>n</sub> | 0,65 |
| AC-3            | 6I <sub>n</sub>   | U <sub>n</sub> | 0,35 | I <sub>n</sub>    | 0,17U <sub>n</sub> | 0,35 | 8I <sub>n</sub>                      | 1,1U <sub>n</sub> | 0,35 | 6I <sub>n</sub>                     | 1,1U <sub>n</sub> | 0,35 |
| AC-4            | 6I <sub>n</sub>   | U <sub>n</sub> | 0,35 | I <sub>n</sub>    | U <sub>n</sub>     | 0,35 | 12I <sub>n</sub><br>10I <sub>n</sub> | 1,1U <sub>n</sub> | 0,35 | 10I <sub>n</sub><br>8I <sub>n</sub> | 1,1U <sub>n</sub> | 0,35 |

| Kategorie DC | I                 | U              | L/R (ms) | I                 | U <sub>r</sub>    | L/R (ms) | I               | U                 | L/R (ms) | I                | U <sub>r</sub>    | L/R (ms) |
|--------------|-------------------|----------------|----------|-------------------|-------------------|----------|-----------------|-------------------|----------|------------------|-------------------|----------|
| DC-1         | I <sub>n</sub>    | U <sub>n</sub> | 1        | I <sub>n</sub>    | U <sub>n</sub>    | 1        | -               | -                 | -        | -                | -                 | -        |
| DC-2         | 2,5I <sub>n</sub> | U <sub>n</sub> | 2        | I <sub>n</sub>    | 0,1U <sub>n</sub> | 7,5      | 4I <sub>n</sub> | 1,1U <sub>n</sub> | 2,5      | 4 I <sub>n</sub> | 1,1U <sub>n</sub> | 2,5      |
| DC-3         | 2,5I <sub>n</sub> | U <sub>n</sub> | 2        | 2,5I <sub>n</sub> | U <sub>n</sub>    | 2        | 4 <sub>n</sub>  | 1,1U <sub>n</sub> | 2,5      | 4 I <sub>n</sub> | 1,1U <sub>n</sub> | 2,5      |

$I_n$ ..... Jmenovitý proud

$U_n$  ..... Jmenovité napětí

$U_r$ ..... Zotavené napětí

## 1.2 Izolační vzdálenosti

Dalším důležitým parametrem stykače jsou izolační vzdálenosti. Dostatečná izolační vzdálenost musí být jak mezi živými částmi různé polarity, tak i mezi živými částmi a kostrou. V tabulce 2 jsou uvedeny nejmenší povolené povrchové cesty a vzdušné vzdálenosti. Volba izolační vzdálenosti závisí na tom, v jakém provozu bude přístroj pracovat. [4]

**Tabulka 1-3 - Izolační vzdálenosti [4]**

| Izolační napětí |        | Skupina B       |    |                | Skupina C       |    |                | Skupina D       |    |                |
|-----------------|--------|-----------------|----|----------------|-----------------|----|----------------|-----------------|----|----------------|
|                 |        | Povrchová cesta |    | Vzdušná vzdál. | Povrchová cesta |    | Vzdušná vzdál. | Povrchová cesta |    | Vzdušná vzdál. |
|                 |        |                 |    |                |                 |    |                |                 |    |                |
| DC [V]          | AC [V] | a               | b  |                | a               | b  |                | a               | b  |                |
| 250             | 250    | 3               | 4  | 3              | 4               | 6  | 4              | 6               | 10 | 6              |
| 440             | 380    | 3               | 4  | 3              | 4               | 6  | 4              | 6               | 10 | 6              |
| 600             | 500    | 4               | 6  | 4              | 6               | 10 | 3              | 10              | 14 | 8              |
| 1200            | 1000   | 6               | 10 | 6              | 10              | 14 | 8              | 14              | 20 | 10             |

Poznámky: Rozměry jsou v mm.

Skupina B: Elektrické předměty v budovách, laboratořích a dílnách s čistým provozem.

Skupina C: Elektrické předměty v prostředí s horšími podmínkami, ale chráněné kryty.

Skupina D: Elektrické předměty vystavené venkovnímu prostředí, jež nelze chránit kryty.

Délky povrchových cest:  $a$  – pro ověřené izolanty;  
 $b$  – pro neověřené izolanty.

## 2 PARAMETRY STYKAČE

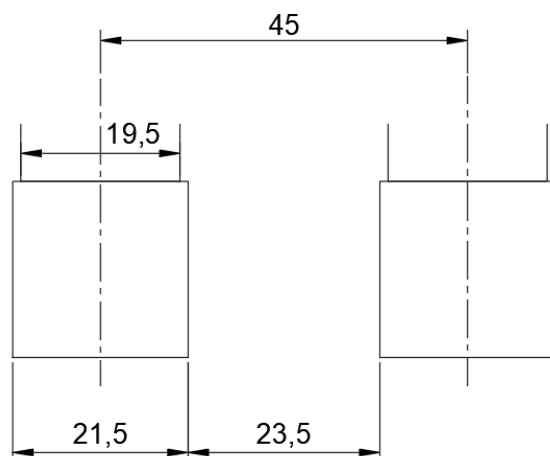
Ověřovaný stykač je V 140 F. Parametry ověřovaného stykače jsou uvedeny v tabulce 2-1.

**Tabulka 2-1 - Parametry stykače**

|   |                  |
|---|------------------|
| Izolační napětí $U_i$                       | 690 V            |
| Jmenovitý proud $I_n$                       | 190 A            |
| Kategorie užití                             | AC - 3           |
| Norma                                       | ČSN EN 60947-4-1 |
| Jmenovité napětí cívky elektromagnetu $U_o$ | 220 V/50 Hz      |

### 2.1 Izolace

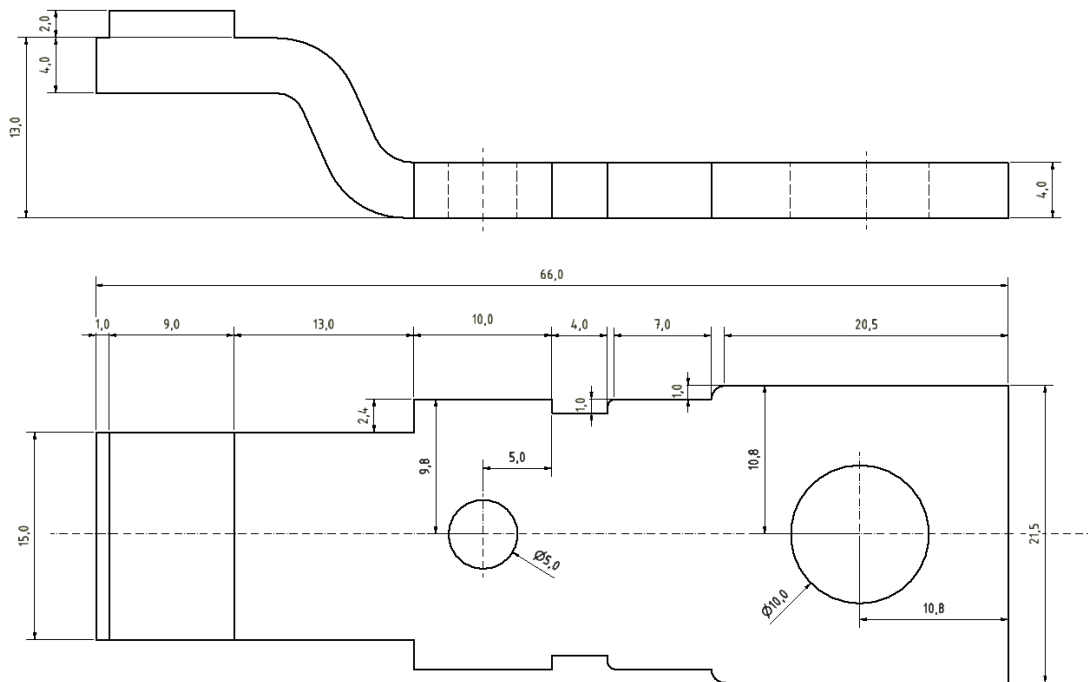
Izolační vzdálenost ověřovaného stykače je 23,5 mm (obrázek 2-1). Tato izolační vzdálenost odpovídá skupině D podle tabulky 1-2.



**Obrázek 2-1 - Izolační vzdálenost**

## 2.2 Rozměry proudovodné dráhy

Rozměry proudovodné dráhy ověřovaného stykače jsou na obrázku 2-2.



**Obrázek 2-2 - Rozměry proudovodné dráhy**

Stykač musí být schopený přenášet i nejvyšší zkratový proud  $I_K$ .

$$I_K = 8 * I_n = 8 * 190 = 1520 \text{ A} \quad (2-01)$$

Amplituda první asymetrické vlny zkratového proudu při  $\cos \varphi = 0,35$ .

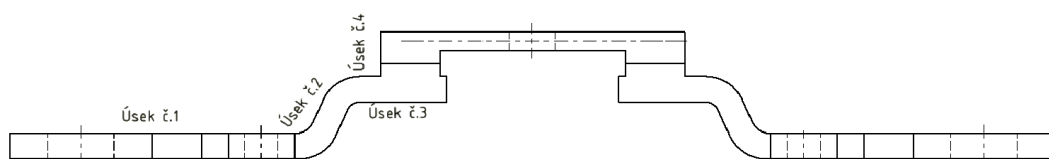
$$I_d \approx 1,4 * \sqrt{2} * I_K \doteq 2 * I_K = 2 * 1520 = 4560 \text{ A [2]} \quad (2-02)$$

Jelikož proudovodná dráha nemá konstantní šířku, byla využita část proudovodné dráhy, která má nejmenší šířku. Nejmenší šířku má část, která se zvedá. Šířka této části je 15 mm. S tímto rozměrem bylo vypočítáno proudovodné zatížení  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{I_n}{S} = \frac{I_n}{a*b} = \frac{190}{15*4} = 3,16 \text{ Amm}^{-2} \quad (2-03)$$

### 3 VÝPOČET ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL PŮSOBÍCÍ NA POHYBLIVÝ KONTAKT STYKAČE

Proudovodná dráha byla rozdělena na čtyři úseky, aby mohly být vypočítány působící elektrodynamické síly na pohyblivý kontakt. Při výpočtech byla zavedena určitá zjednodušení a idealizace. Šířka úseku č. 1 byla zprůměrována a úsek č. 2 byl zidealizován tak, že záhyb byl uvažován pravoúhlý.

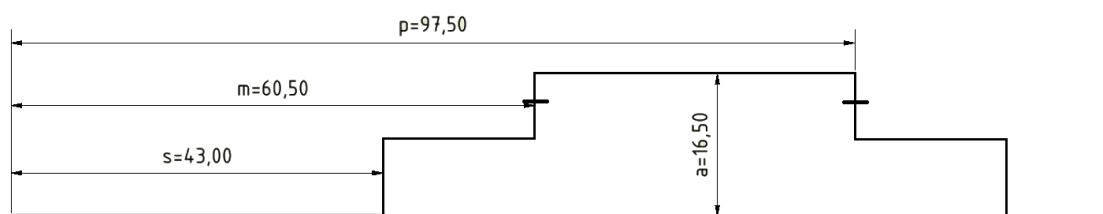


Obrázek 3-1 - Úseky proudovodné dráhy

#### 3.1 Výpočet působící síly od úseku č. 1

Byla vypočítána síla působící na úsek č. 1 (obr. 3-2). V tomto případě, se jedná o dva paralelní vodiče, které jsou vůči sobě posunuty.

$$p = 97,5 \text{ mm}; m = 60,5 \text{ mm}; n = 0 \text{ mm}; s = 43 \text{ mm}; a = 16,5 \text{ mm}$$



Obrázek 3-2 - Vzdálenost úseku č. 1 od pohyblivého kontaktního můstku

Přitažlivá síla  $F_1$  působící na pohyblivý kontakt od úseku č. 1.

$$F_1 = 10^{-7} * I_d^2 \left[ \sqrt{\left(\frac{p-n}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{p-s}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{m-n}{a}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{m-s}{a}\right)^2 + 1} \right] =$$

$$10^{-7} * 3040^2 \left[ \sqrt{\left(\frac{97,5-0}{16,5}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{97,5-43}{16,5}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{60,5-0}{16,5}\right)^2 + 1} + \right.$$

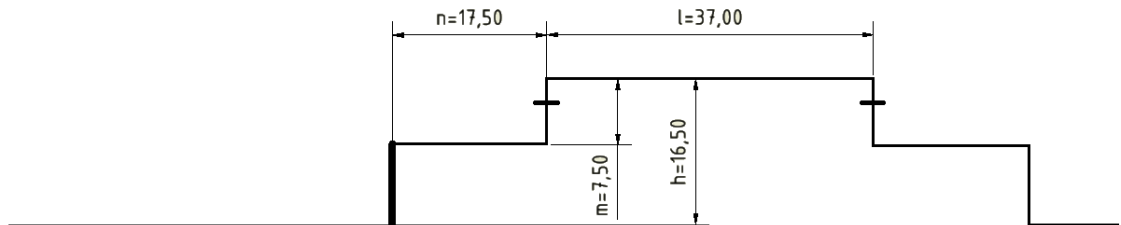
$$\left. \sqrt{\left(\frac{60,5-43}{16,5}\right)^2 + 1} \right] = 0,184 \text{ N} \quad (3-01)$$



### 3.2 Výpočet působící síly od úseku č. 2

Při výpočtu působící síly na pohyblivý kontakt byla zavedena idealizace. Tato idealizace spočívá v tom, že tato část dráhy byla uvažována jako kolmá (obrázek 3-3) na pohyblivý kontakt.

$m = 7,5 \text{ mm}$ ;  $n = 17,5 \text{ mm}$ ;  $a = 16,5 \text{ mm}$ ;  $l = 37 \text{ mm}$



**Obrázek 3-3 - Vzdálenost úseku č. 2 od pohyblivého kontaktního můstku**

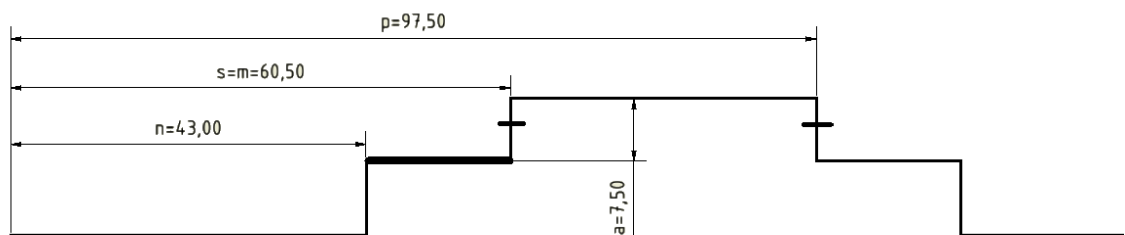
Odpudivá síla  $F_2$  působící na pohyblivý kontakt od úseku č. 2.

$$F_2 = 10^{-7} * I_d^2 * \ln \left( \frac{\sqrt{n^2 + h^2} + h}{\sqrt{l^2 + h^2} + h} * \frac{\sqrt{l^2 + m^2} + m}{\sqrt{n^2 + m^2} + m} \right) = 10^{-7} * 3040^2 * \ln \left( \frac{\sqrt{17,5^2 + 16,5^2} + 16,5}{\sqrt{37^2 + 16,5^2} + 16,5} * \frac{\sqrt{37^2 + 7,5^2} + 7,5}{\sqrt{17,5^2 + 7,5^2} + 7,5} \right) = 0,1783 \text{ N} \quad (3-02)$$

### 3.3 Výpočet působící síly od úseku č. 3

Při výpočtu úseku č. 3 se opět jedná o dva paralelní vodiče, které jsou vůči sobě posunuty.

$p = 97,5 \text{ mm}$ ;  $m = 60,5 \text{ mm}$ ;  $n = 43 \text{ mm}$ ;  $s = 60,5 \text{ mm}$ ;  $a = 7,5 \text{ mm}$



**Obrázek 3-4 - Vzdálenost úseku č. 3 od pohyblivého kontaktního můstku**

Přitažlivá síla  $F_3$  působící na pohyblivý kontakt od úseku č. 3.

$$F_3 = 10^{-7} * I_d^2 \left[ \sqrt{\left(\frac{p-n}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{p-s}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{m-n}{a}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{m-s}{a}\right)^2 + 1} \right] =$$

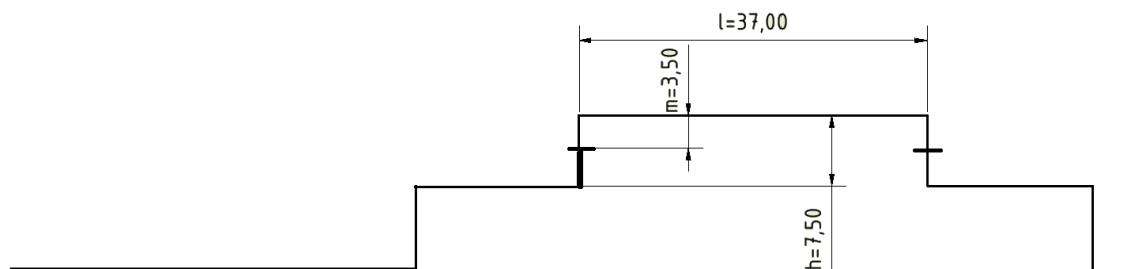
$$10^{-7} * 3040^2 \left[ \sqrt{\left(\frac{97,5-43}{7,5}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{97,5-60,5}{7,5}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{60,5-43}{7,5}\right)^2 + 1} + \right.$$

$$\left. \sqrt{\left(\frac{60,5-60,5}{7,5}\right)^2 + 1} \right] = 0,705 \text{ N} \quad (3-03)$$

### 3.4 Výpočet působící síly od úseku č. 4

Poslední úsek č. 4 je kolmý k pohyblivému kontaktu.

$h = 7,5 \text{ mm}$ ;  $m = 3,5 \text{ mm}$ ;  $l = 37 \text{ mm}$



Obrázek 3-5 - Vzdálenost úseku č. 4 od pohyblivého kontaktního můstku

Odpudivá síla  $F_4$  působící na pohyblivý kontakt od úseku č.4.

$$F_4 = 10^{-7} * I_d^2 * \ln \left( \frac{h}{m} * \frac{\sqrt{l^2 + m^2} + m}{\sqrt{l^2 + h^2} + h} \right) = 10^{-7} * 3040^2 * \ln \left( \frac{7,5}{3,5} * \frac{\sqrt{37^2 + 3,5^2} + 3,5}{\sqrt{37^2 + 7,5^2} + 7,5} \right) =$$

$$0,6911 \text{ N} \quad (3-04)$$

### 3.5 Výpočet působící síly v kontaktní úžině

Aby mohly být vypočítány působící síly v kontaktní úžině, musí být zvolen materiál kontaktních destiček. Kontaktní destička, která je natvrdo připájená k můstku, je ze sloučeniny stříbra. Pro výpočet bylo uvažováno čisté stříbro Ag.

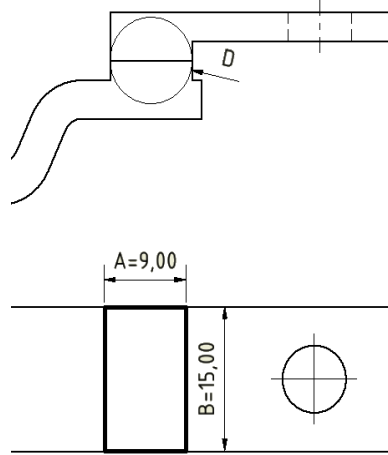
Jako první byla vypočítána velikost bezpečnostního provozního stykového odporu  $R_{s1}$ . Napětí měknutí  $U_{mek}$  se nachází v tabulce 1.9 [1].

$$R_{s1} \approx \frac{U_{mek}}{2 * I_n} = \frac{0,09}{2 * 190} = 236 \text{ } \mu\Omega \quad (3-05)$$

Poté byl vypočítán stykový odpor na mezi svaření  $R_{s2}$ . Napětí svaření  $U_{svař}$  je v tabulce 1.9 [1]. Konstanta  $k = 1,5$  byla uvažována jen pro stříbrné destičky. Pokud

by byl použit jiný materiál než stříbro, tak místo konstanty  $k$  by musel být použit koeficient  $C_k$  a konstanta  $x$  [2].

$$R_{s2} \approx \frac{U_{svař}}{k \cdot I_k} = \frac{0,37}{1,5 \cdot 1520} = 162 \mu\Omega \quad (3-06)$$



**Obrázek 3-6 - Proudovodná úžina**

Pro minimální přitlačnou sílu  $F_5$  byl vybrán menší z odporů  $R_{s1}$  a  $R_{s2}$ . Materiálová konstanta pro stříbro  $k_{ag}$  se nachází v tabulce 2-9 [2]. Bylo předpokládáno neagresivní prostředí.

Jedná se o čelní kontakty v přímkovém dotyku, proto za exponent  $n$  byla dosazena hodnota 0,5. [4]

$$F_5 = \left( \frac{k_{Ag}}{R_{s2}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left( \frac{3 \cdot 10^{-4}}{162 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{0,5}} = 3,4175 \text{ N} \quad (3-07)$$

Jelikož na můstku jsou dva kontakty, tak musí působit dvojnásobná minimální síla  $F_{kmin}$ .

$$F_{kmin} = 2 \cdot F_5 = 2 \cdot 3,4175 = 6,835 \text{ N} \quad (3-08)$$

Idealizovaný kruhový průměr dotykové plošky  $d$ . Tvrdost stříbra  $H$  byla zjištěna z tabulky 2-1 [2].

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_1}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,4175}{\pi \cdot 4 \cdot 10^8}} = 0,111 \text{ mm} \quad (3-09)$$

Náhradní idealizovaný průměr dlouhé úžiny  $D$  byl stanoven jako geometrický střed os  $A$  a  $B$  (obrázek 3-6).

$$D = \sqrt{A \cdot B} = \sqrt{9 \cdot 15} = 11,619 \text{ mm} \quad (3-10)$$

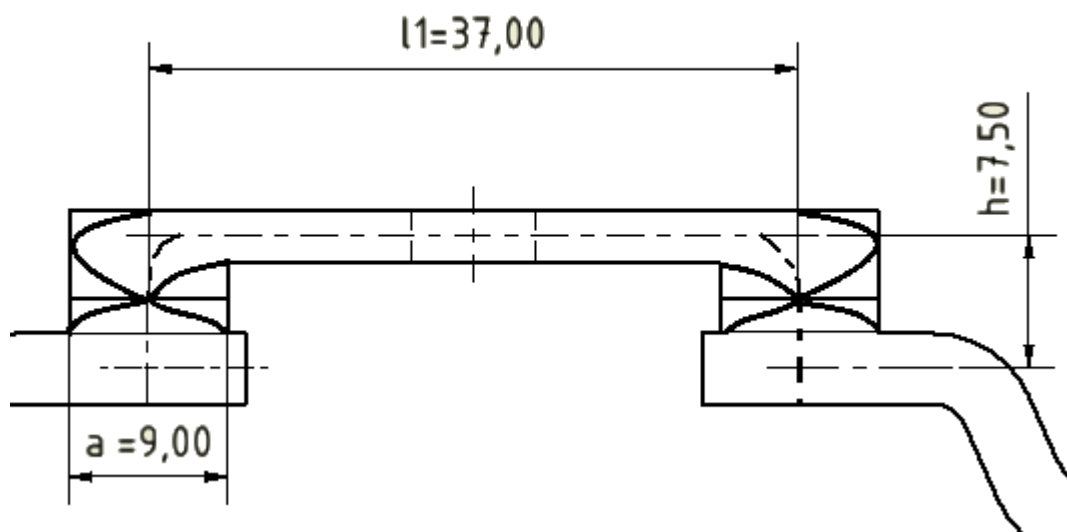
Odpudivá síla v jedné úžině  $F_u$ .

$$F_u = 10^{-7} * I_d^2 * \ln\left(\frac{D}{a}\right) = 10^{-7} * 4560^2 * \ln\left(\frac{11,619}{0,111}\right) = 4,294 \text{ N} \quad (3-11)$$

### 3.6 Výpočet působící síly na můstek s přilehlými úseky kontaktních destiček

V tomto případě se jedná o U-záhyb, který tvoří pohyblivý kontakt přilehlého kolmého úseku kontaktních destiček a části proudovodné dráhy.

$$a = 9 \text{ mm}; h = 7,5 \text{ mm}; l = 37 \text{ mm};$$



Obrázek 3-7 - U-záhyb

Rozměr kontaktu je teoreticky roven  $a$  (obrázek 3-7). Jelikož se jedná o dráhu zaškrncenou stykovou úžinou, dochází ke zmenšení její průměrné šířky. Zmenšení bylo odhadnuto činitelem 0,65. [2]

$$a' = 0,65 * a = 0,65 * 9 = 5,85 \text{ mm} \quad (3-12)$$

Působící odpudivá síla v můstku  $F_{UZ}$ .

$$F_{UZ} = 2 * 10^{-7} * I_d^2 * \ln\left(\frac{2 * l}{a'} * \frac{\sqrt{h^2 + \left(\frac{a'}{2}\right)^2} + h}{\sqrt{h^2 + l^2} + h}\right) = 2 * 10^{-7} * 3040^2 * \ln\left(\frac{2 * 34,075}{5,85} * \frac{\sqrt{7,5^2 + \left(\frac{5,85}{2}\right)^2} + 7,5}{\sqrt{7,5^2 + 34,075^2} + 7,5}\right) = 2,6845 \text{ N} \quad (3-13)$$

### 3.7 Bilance elektrodynamických sil působících na kontaktní můstek

Bilance elektrodynamických sil byla potřebná k tomu, aby bylo zjištěno, jaké síly působí na pohyblivý kontaktní můstek.

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| Přitažlivé síly od vodorovných úseků                               | $2 * (F_1 + F_3) = 1,7781 \text{ N}$  |
| Odpudivé síly od kolmých úseků                                     | $2 * (F_2 + F_4) = -1,7388 \text{ N}$ |
| Odpudivé síly od proudovodných úžin                                | $2 * F_u = -8,588 \text{ N}$          |
| Odpudivá síla od U záhybu  | $F_{UZ} = -2,6845 \text{ N}$          |
| Výsledná elektrodynamická síla působící<br>proti kontaktní pružině | $F_E = -11,233 \text{ N}$             |

Výsledná elektrodynamická síla  $F_E$  vyšla záporně, což znamená, že síla působící na kontaktní můstek je odpudivá. Z toho plyne, že kontaktní můstek musí být přitlačován k proudovodné dráze.

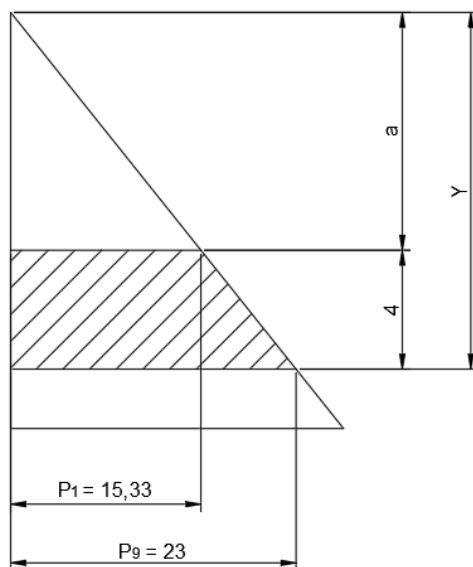
## 4 NÁVRH PRUŽIN

Ve stykači se nacházejí dva druhy pružin. Přítlačná pružina a vypínací pružina. Jak názvy napovídají, tak přítlačná pružina bude přitlačovat kontaktní můstek k proudovodné dráze, zatímco vypínací pružina slouží k nadzvednutí kontaktního můstku a vypínacího mechanismu.[2]

### 4.1 Přítlačná pružina

Jako první byla stanovena přítlačná síla  $F_K$  kontaktní pružiny v sepnutém stavu. Přítlačná síla musí být větší než součet minimální přítlačné síly kontaktů  $F_{kmin}$  a elektrodynamických sil  $F_E$ , působících (při zkratu) proti pružině. Konstanta bezpečnosti přitlaku  $k$  byla zvolena 1,6.

$$F_K = k * F_{Kmin} + F_E = 1,6 * 6,835 + 11,233 = 22,169 \doteq 23 \text{ N} \quad (4-01)$$



**Obrázek 4-1 - Pracovní diagram  
přítlačné pružiny**

Dále byl navržen pracovní diagram pružiny (obrázek 4-1) podle zvoleného zdvihu pružiny 4 mm (pružina kontakt jen dotlačuje). Síla  $P_1$  byla zvolena  $2/3 P_9$ , aby pružina nebyla příliš dlouhá. Síla  $P_9$  je  $F_K$ . [2]

$$P_1 = \frac{2}{3} * P_9 = \frac{2}{3} * 23 = 15,33 \text{ N} \quad (4-02)$$

Byl stanoven zdvih a.

$$a = \frac{z \cdot P_1}{P_9 - P_1} = \frac{4 \cdot 15,33}{28 - 15,33} = 8 \text{ mm} \quad (4-03)$$

Stlačení pružiny v plném stavu zatížení.

$$Y = a + 4 = 8 + 4 = 12 \text{ mm} \quad (4-04)$$

Průměr pružiny  $D_s$  byl odhadnut na 9 mm a průměru drátu  $d$  byl z tabulky 3-1 [2] odhadnut na 1,12 mm. A je poměr mezi  $D_s$  a  $d$ .

$$A = \frac{D_s}{d} = \frac{9}{1,12} = 8,04 [-] \quad (4-05)$$

Poté, co bylo vypočteno  $A$ , byl vypočten Wahlův korekční činitel  $\varphi$ .

$$\varphi = \frac{A - 0,25}{A - 1} + \frac{0,615}{A} = \frac{8,04 - 0,25}{8,04 - 1} + \frac{0,615}{8,04} = 1,1831 [-] \quad (4-06)$$

Dále bylo určeno dovolené namáhání ve smyku  $\tau_D$ . Pevnost materiálu v tahu  $\sigma_{pt}$  byla určena z tabulky 3-1 [2]. Činitel bezpečnosti pro  $\mu$  (pro ocel) byl zvolen (případně interpolací) z tabulky 3-2 [2].

$$\tau_D = \frac{\sigma_{pt}}{1,6 \cdot \mu} = \frac{2450}{1,6 \cdot 3} = 510,42 \text{ MPa} \quad (4-07)$$

Ze známých hodnot byl vypočítán průměr drátu.

$$d = \sqrt{\frac{8 \cdot P_9 \cdot A \cdot \varphi}{\pi \cdot \tau_D}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 23 \cdot 8,04 \cdot 1,1831}{\pi \cdot 510,42 \cdot 10^6}} = 1,04 \text{ mm} \quad (4-08)$$

Průměr drátu byl roven  $d = 1,04$  mm. Jelikož to není normovaný průměr drátu, musela být zvolena nejbližší vyšší hodnota průměru podle ČSN 42 6450, což je  $d = 1,12$  mm.

Střední průměr pružiny  $D_s$ .

$$D_s = A \cdot d = 8,04 \cdot 1,12 = 9 \text{ mm} \quad (4-09)$$

Výpočet činných závitů (pro modul pružnosti ve smyku  $G = 8,2 \cdot 10^4$  MPa)

$$n = \frac{Y \cdot G \cdot d^4}{8 \cdot D_s \cdot P_9} = \frac{0,012 \cdot 8,2 \cdot 10^{10} \cdot 0,00112^4}{8 \cdot 0,009 \cdot 23} = 11,54 \doteq 12 \text{ závitů} \quad (4-10)$$

Jelikož počet závitů musí být celé číslo, výsledek byl zaokrouhlen nahoru.

Se dvěma závěrnými závity ( $n_z = 2$ ) má mít pružina celkem  $z = 14$  závitů.

Protože při práci na sebe závity pružiny nesmí dosednout, skutečná dosedová délka byla zvětšena oproti teoretické o 8–15 % s ohledem na nerovnosti drátu. Stlačená délka pružiny  $L_9$ .

$$L_9 = (1,08/1,15)^2 \cdot z \cdot d = (1,08/1,15)^2 \cdot 16 \cdot 1,12 = 13,83 \text{ mm} \quad (4-11)$$

Délka pružiny ve volném stavu  $L_0$ . Při výpočtu délky pružiny byl upravován výpočet tak, aby  $L_0$  bylo celé číslo. [2]

$$L_0 = L_9 + Y = 14 + 12 = 26 \text{ mm} \quad (4-12)$$

Stoupání závitů pružiny  $s$ .

$$s = \frac{L_0 - n_z \cdot d}{n} = \frac{26 - 2 \cdot 1,12}{12} = 1,68 \text{ mm} \quad (4-13)$$

## 4.2 Vypínací pružiny

Pro návrh vypínací pružiny bylo potřeba odhadnout hmotnost vypínacího systému. Vypínací systém tvoří kotva elektromagnetu s nosnou konstrukcí a kontakty. Tíha vypínacího systému byla odhadnuta na 6 N.

Dále byl postup výpočtu velice podobný výpočtu přitlačné pružiny.

Bezpečnostní přebytek síly  $k$  vypínacích pružin byl zvolen 1,5.

$$P_1 = k \cdot F_{ko} = 1,5 \cdot 6 = 9 \text{ N} \quad (4-14)$$

Je vhodné, aby vypínací pružina měla měkkou charakteristiku vzhledem k zatěžování elektromagnetu. Síla pružiny v zapnutém stavu byla zvolena asi o 25% větší.

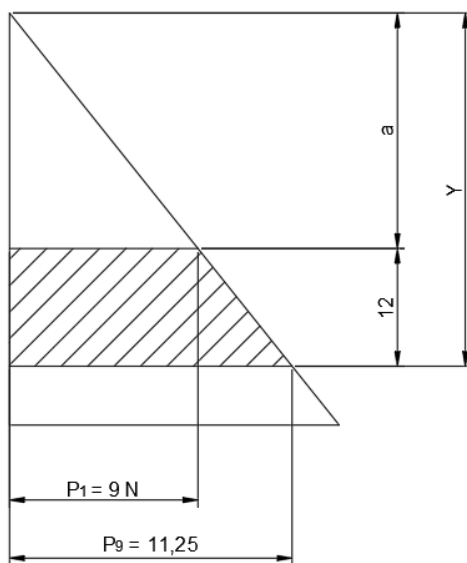
$$P_9 = 1,25 \cdot P_1 = 1,25 \cdot 9 = 11,25 \text{ N} \quad (4-15)$$

Z konstrukčních důvodů jsou čtyři pružiny, každá se čtvrtěčnými hodnotami.

$$P_{1/4} = \frac{P_1}{4} = \frac{9}{4} = 2,25 \text{ N} \quad (4-16)$$

$$P_{9/4} = \frac{P_9}{4} = \frac{11,25}{4} = 2,8125 \text{ N} \quad (4-17)$$

Z pracovního diagramu (obrázek 4-2) byly vypočteny hodnoty obdobně jako v kapitole 4.1.



**Obrázek 4-2 - Pracovní diagram čtyř vypínacích pružin**



Vzdálenost rozepnutých kontaktů byla zvolena 7 mm. Celkový zdvih elektromagnetu  $z$  byl obdržen sečtením těchto hodnot.

$$z = 7 + 4 = 11 \text{ mm} \quad (4-18)$$

Zdvih  $a$  byl stanoven podle vzorce.

$$a = \frac{z \cdot P_1}{P_9 - P_1} = \frac{11 \cdot 9}{18,75 - 9} = 44 \text{ mm} \quad (4-19)$$

Stlačení pružiny v plném zatížení  $Y$ .

$$Y = a + z = 44 + 11 = 55 \text{ mm} \quad (4-20)$$

Poměr  $A = \frac{D_s}{d}$  byl zvolen  $A = 16$  [–].

Wahlův součinitel  $\varphi$ .

$$\varphi = \frac{A - 0,25}{A - 1} + \frac{0,615}{A} = \frac{16 - 0,25}{16 - 1} + \frac{0,615}{6,43} = 1,0884 \text{ [–]} \quad (4-21)$$

Pevnost materiálu v tahu  $\delta_{pt}$  byla určena z tabulky 3-1 [2]. Činitel bezpečnosti pro  $\mu$  (pro ocel) byl zvolen (případně interpolací) z tabulky 3-2 [2].

$$\tau_D = \frac{\sigma_{pt}}{1,6 \cdot \mu} = \frac{2650}{1,6 \cdot 3} = 510,42 \text{ MPa} \quad (4-22)$$

Jelikož jsou čtyři pružiny, byla zde použita síla  $P_{9/4}$ .

$$d = \sqrt{\frac{8 \cdot P_{9/4} \cdot A \cdot \varphi}{\pi \cdot \tau_D}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 4,4875 \cdot 16 \cdot 1,2338}{\pi \cdot 552,08 \cdot 10^6}} = 0,6136 \text{ mm} \quad (4-23)$$

Průměr drátu vyšel  $d = 0,6136$  mm. Poněvadž tohle není normovaný průměr drátu, musela být zvolena nejbližší vyšší hodnota průměru podle ČSN 42 6450, což je  $d = 0,63$  mm.

Střední průměr  $D_s$ .

$$D_s = A \cdot d = 16 \cdot 0,63 = 10,08 \text{ mm} \quad (4-24)$$

Počet závitů  $n$ , zde byla opět použita síla  $P_{9/4}$ .

$$n = \frac{Y \cdot G \cdot d}{8 \cdot A^3 \cdot P_{9/4}} = \frac{0,06 \cdot 8,2 \cdot 10^{10} \cdot 0,00063}{8 \cdot 16^3 \cdot 4,6875} \doteq 31 \text{ závitů} \quad (4-25)$$

Délka pružiny v dosedovém stavu  $L_9$ .

$$L_9 = (1,08/1,15)^2 \cdot z \cdot d = (1,08/1,15)^2 \cdot 33 \cdot 0,63 = 18,34 \text{ mm} \quad (4-26)$$

Délka pružiny ve volném stavu  $L_0$ .

$$L_0 = L_9 + Y = 12 + 55 \doteq 74 \text{ mm} \quad (4-27)$$

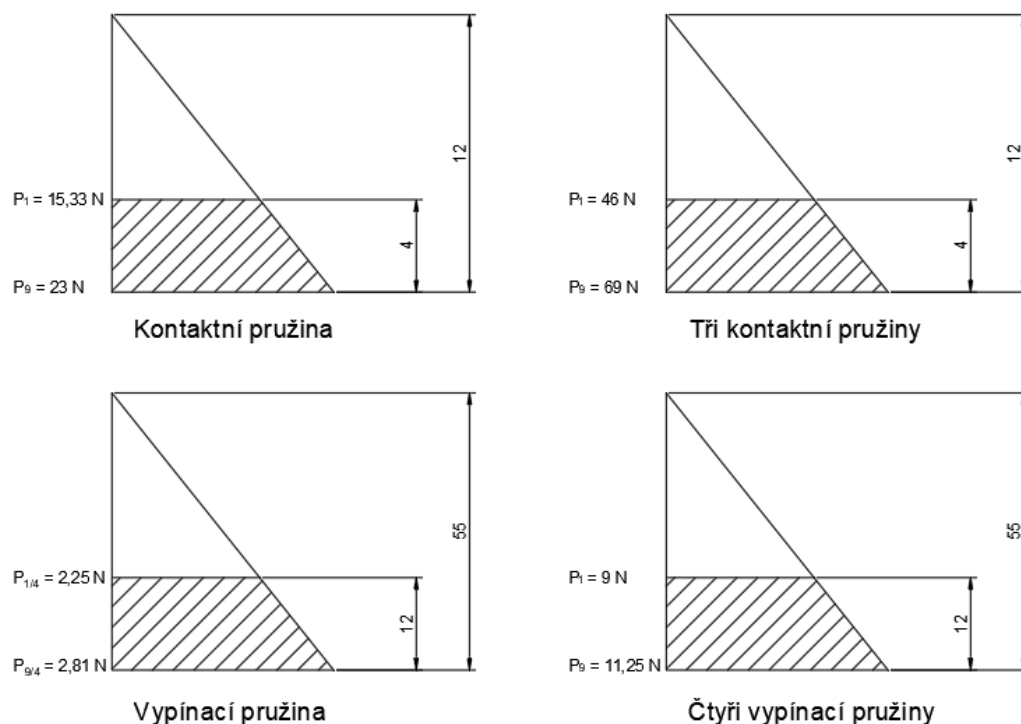
Stoupání závitů pružiny  $s$ .

$$s = \frac{L_0 - n_z \cdot d}{n} = \frac{67 - 2 \cdot 0,63}{31} = 2,34 \text{ mm} \quad (4-28)$$

## 5 ELEKTROMAGNET

### 5.1 Průběh pasivních odporů

Když začne protékat proud v obvodu elektromagnetu uvede se do pohybu kotva elektromagnetu spolu s konstrukcí, která nese pohyblivé kontakty tří fází.



**Obrázek 5-1 - Pracovní diagramy pružin**

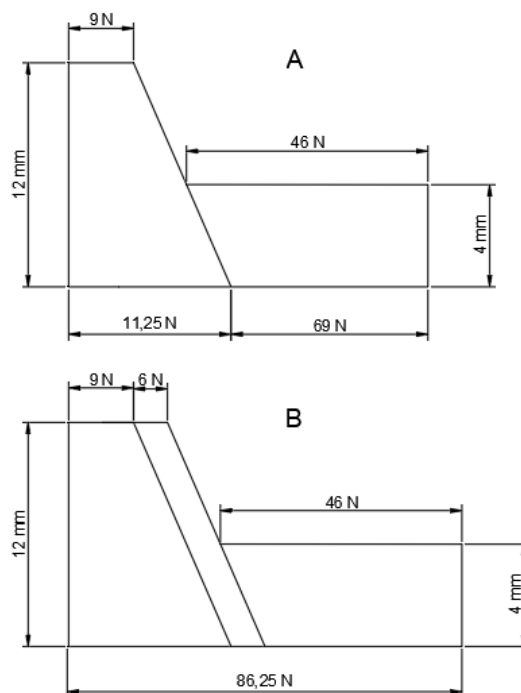
Během celého 12 mm zdvihu probíhá napínání čtyř vypínacích pružin a v závěru zdvihu na dráze 4 mm napínání tří kontaktních pružin. Vzdušná vzdálenost oddálených kontaktů je 7 mm. Výsledný průběh všech odporů byl stanoven graficky. Byly sečteny pracovní diagramy jednotlivých pružin (obrázek 5-1). Ve stykači jsou pružiny namontovány již v předepnutém stavu silou  $F$ , proto stačí nakreslit při jejich součtu jen pracovní část diagramu (obrázek 5-2 A). [2]

Pracovní poloha stykače je dána montáží na svislé panely v rozvodných skříních. Elektromagnet v tomto případě musí mimo napínání pružin překonávat tření urychlovaných hmot, vyvolané působením jejich tíhy na vodorovné kluzné plochy. Elektromagnet byl dimenzován pro nejnepríznivější stav. Ten nastane v poloze, kdy

elektromagnet zvedá i celý kontaktní systém. Tah 6 N vyvolaných gravitací se musí zakomponovat do diagramu pružin (obrázek 5-2 B).

S ohledem na bezpečnou činnost stykače byla zvolena potřebná počáteční přitlačná síla  $F_p$  v rozmezí (1,5-3) F. [2]

$$F_p = 2 * (P_{1p} + P_s) = 2 * (9 + 6) = 30 \text{ N} \quad (5-01)$$



**Obrázek 5-2 - Diagram pracovních částí pružin (vypínací pružina, tíha, přitlačná pružina)**

## 5.2 Tah elektromagnetu

Zdvih elektromagnetu je 12 mm. Jelikož jsou dvě vzduchové mezery, potom je  $\Sigma\delta = 2 * 11 = 24 \text{ mm} = 2,4 \text{ cm}$ . (5-02)

Průřez jádra byl zvolen  $S = 11 \text{ cm}^2$ . Z diagramu 3-25 [2] byl odečten činitel  $K_F$  pro křivku D, pro poměr  $S : \Sigma\delta = 11 : 2,4 = 5$ , činitel  $K_F = 0,35$ . Pro indukci  $B$  byla uvažována  $B = 1,2 \text{ T}$ . [2]

Zátah elektromagnetu  $F_\delta$ .

$$F_\delta = 5,8 * 10^5 * K_F^2 * S = 5,8 * 10^5 * 0,35^2 * 7,5 * 10^{-6} = 31,71 \text{ N} \quad (5-03)$$

Pokud by bylo  $F_\delta$  menší než  $F_p$  (5.03), zátah elektromagnetu by byl nedostatečný, protože by nedokázal překonat síly pružin. Musí se zvětšit průřez jádra.

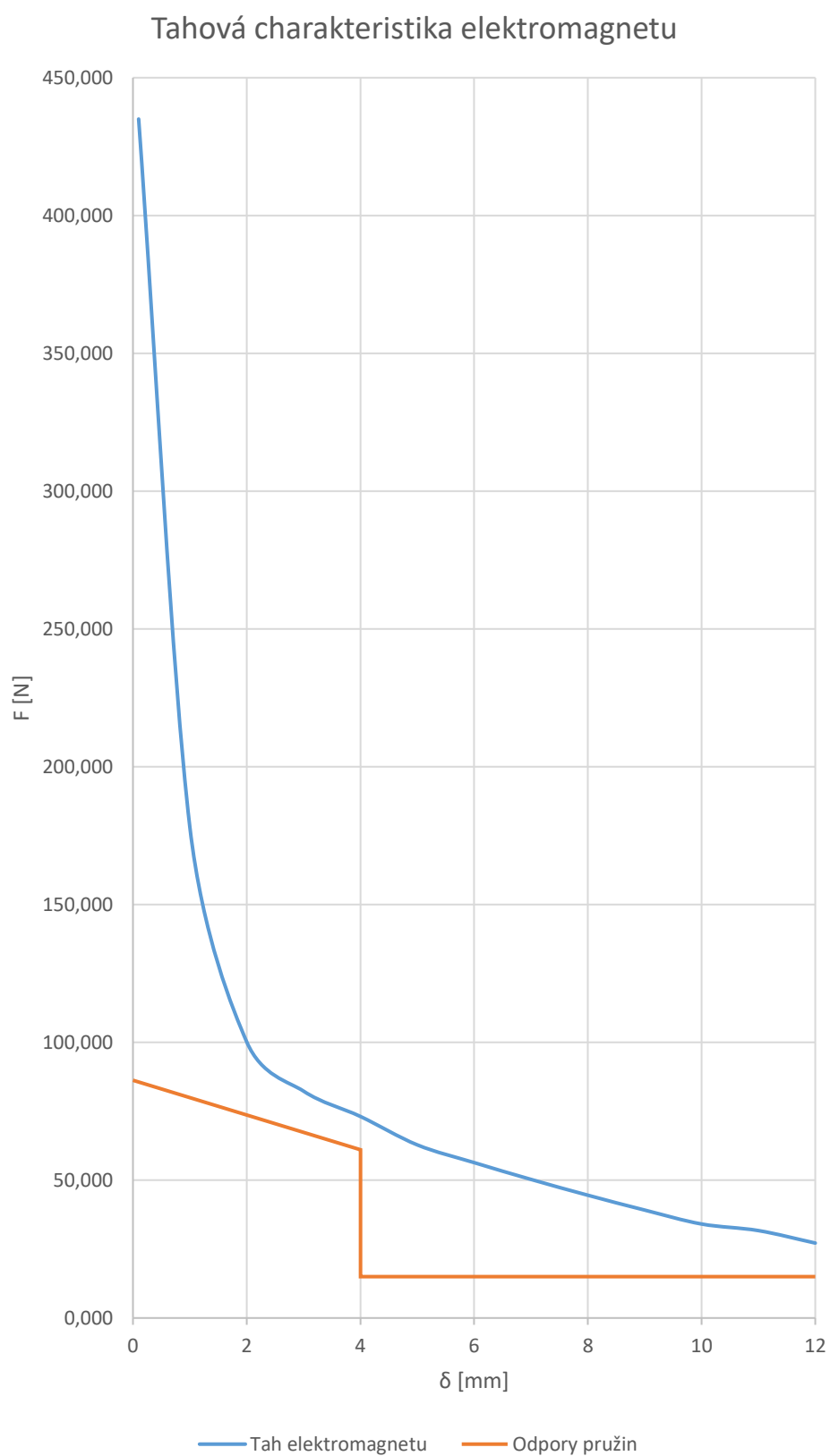
$$F_\delta > F_p \quad (5-04)$$

Z diagramu 3-25 [2] byl vypočten celý průběh tahové síly (statická charakteristika). Vypočtené hodnoty tahu elektromagnetu byly seřazené v tabulce 1 a vyneseny v grafu 1. [2]

**Tabulka 5-1 - Tahová charakteristika elektromagnetu**

| $\delta$<br>[mm] | $\delta$<br>[cm] | $\Sigma\delta$<br>[cm] | $11/\Sigma\delta$<br>[cm <sup>2</sup> /cm] | KF<br>[-] | $K_F^2$<br>[-] | F<br>[N] |
|------------------|------------------|------------------------|--|-----------|----------------|----------|
| 12               | 1,2              | 2,4                    | 3,13                                       | 0,25      | 0,0625         | 27,188   |
| 11               | 1,1              | 2,2                    | 3,41                                       | 0,27      | 0,0729         | 31,712   |
| 10               | 1                | 2,0                    | 3,75                                       | 0,28      | 0,0784         | 34,104   |
| 9                | 0,9              | 1,8                    | 4,17                                       | 0,3       | 0,09           | 39,150   |
| 8                | 0,8              | 1,6                    | 4,69                                       | 0,32      | 0,1024         | 44,544   |
| 7                | 0,7              | 1,4                    | 5,36                                       | 0,34      | 0,1156         | 50,286   |
| 6                | 0,6              | 1,2                    | 6,25                                       | 0,36      | 0,1296         | 56,376   |
| 5                | 0,5              | 1,0                    | 7,50                                       | 0,38      | 0,1444         | 62,814   |
| 4                | 0,4              | 0,8                    | 9,38                                       | 0,41      | 0,1681         | 73,124   |
| 3                | 0,3              | 0,6                    | 12,50                                      | 0,435     | 0,189225       | 82,313   |
| 2                | 0,2              | 0,4                    | 18,75                                      | 0,48      | 0,2304         | 100,224  |
| 1                | 0,1              | 0,2                    | 37,50                                      | 0,64      | 0,4096         | 178,176  |
| 0,1              | 0,01             | 0,0                    | 375,00                                     | 1         | 1              | 435,000  |

Jak je vidět z grafu, křivka tahu elektromagnetu by měla probíhat nad charakteristikou pružin. Toto převýšení by však mělo být minimální, případně nulové. [2]



**Graf 5-1 - Tahová charakteristika elektromagnetu**

### 5.3 Železné jádro a vinutí

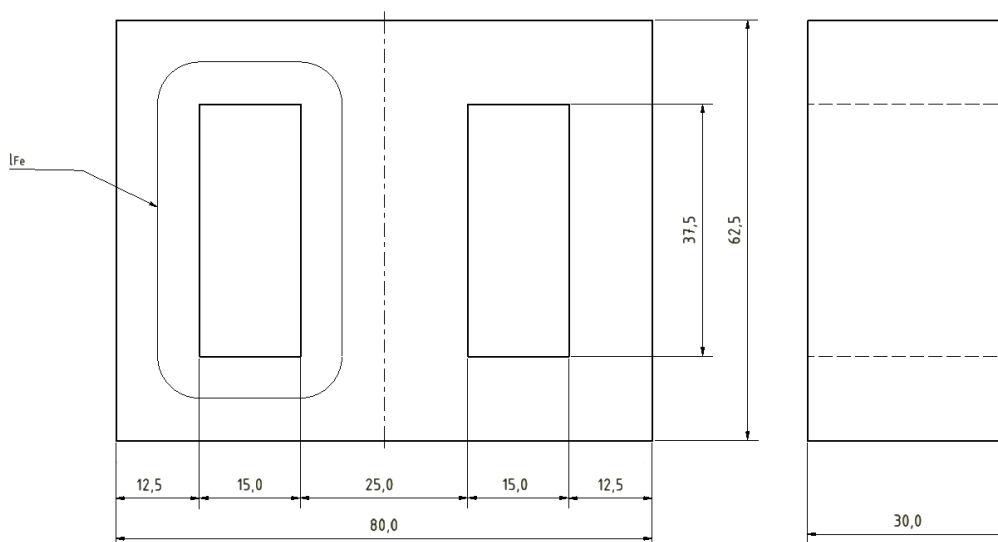
Pro navrhnutý průřez jádra  $S = 7,5 \text{ cm}^2$  byl určen příslušný počet závitů cívky. Indukčnost vzduchové mezery  $B_m = 1,2 \text{ T}$ .  $K_{Fe}$  je činitel plnění průřezu železa, pro plechy tloušťky  $0,35 \text{ mm}$  je  $K_{Fe} = 0,9$ . [2]

$f = 50 \text{ Hz}$ ;  $U = 220 \text{ V}$ .

$$N = \frac{0,85 * U}{4,44 * f * B_m * S * K_{Fe}} = \frac{0,85 * 220}{4,44 * 50 * 1,2 * 7,5 * 10^{-4} * 0,9} = 1039,9 \doteq 1040 \text{ závitů} \quad (5-05)$$

Kvůli dalším výpočtům musely být k jádru  $25 \times 30 \text{ mm}$  předběžně navrhnuty ostatní rozměry plechů. Z tohoto návrhu (obrázek 5-3) byla odečtena délka střední siločáry  $l_{Fe}$ .

$$l_{Fe} = 2 * (37,5 + 12,5) + 2 * \pi * 6,25 = 144,27 \text{ mm} \quad (5-06)$$



**Obrázek 5-3 - Jádro elektromagnetu**

Při dotažené kotvě je indukčnost elektromagnetu  $L_2$ . Koeficient  $K_L$  byl odečten z grafu 3-25 [2] pro křivku D.

$\Sigma \delta = 0,3 \text{ mm}$ ;  $S / \Sigma \delta = 250$ ;  $K_L = 1,2$ ;  $\mu_r = 2000$ ;  $\mu_r * \mu_0 = 2,5 * 10^{-3}$ ;

$$L_2 = \frac{K_L * N^2 * S * \mu_r * \mu_0}{\mu_r * \Sigma \delta + l_{Fe}} = \frac{1,2 * 1040^2 * 7,5 * 10^{-4} * 2,5 * 10^{-3}}{2000 * 0,3 * 10^{-3} + 0,1443} = 3,269 \text{ H} \quad (5-07)$$

Předběžně byl vypočítán klidový proud  $I_2$  při nejvyšším provozním napětí.

$$I_2 \approx \frac{1,1 * U}{\omega * L_2} = \frac{1,1 * 220}{2 * \pi * 50 * 3,269} = 0,235 \text{ A} \quad (5-08)$$

Průřez drátu  $s_d$  při zatížení  $\delta = 3 \text{ A/mm}^2$ .

$$s_d = \frac{l}{\delta} = \frac{0,235}{3} = 0,0785 \text{ mm}^2 \quad (5-09)$$

Tomuto průřezu odpovídá průměr  $d_d = 0,3162 \text{ mm}$ . Byl zvolen drát nejbližšího většího normovaného průměru  $d = 0,355 \text{ mm}$ , tomu odpovídá průřez  $S = 0,0785 \text{ mm}^2$ . Z tabulky 3-26 [2] byla zjištěna tloušťka izolace  $iz$  pro průměr vodiče. Průměr drátu  $d_i$ .

$$d_i = d + iz = 0,355 + 0,04 = 0,395 \text{ mm} \quad (5-10)$$

Délka vrstvy závitů  $l_v$ , tloušťka čela kostry  $t_{\check{c}k} = 2 \text{ mm}$ , výška okna jádra  $l_{vo} = 37,5 \text{ mm}$ .

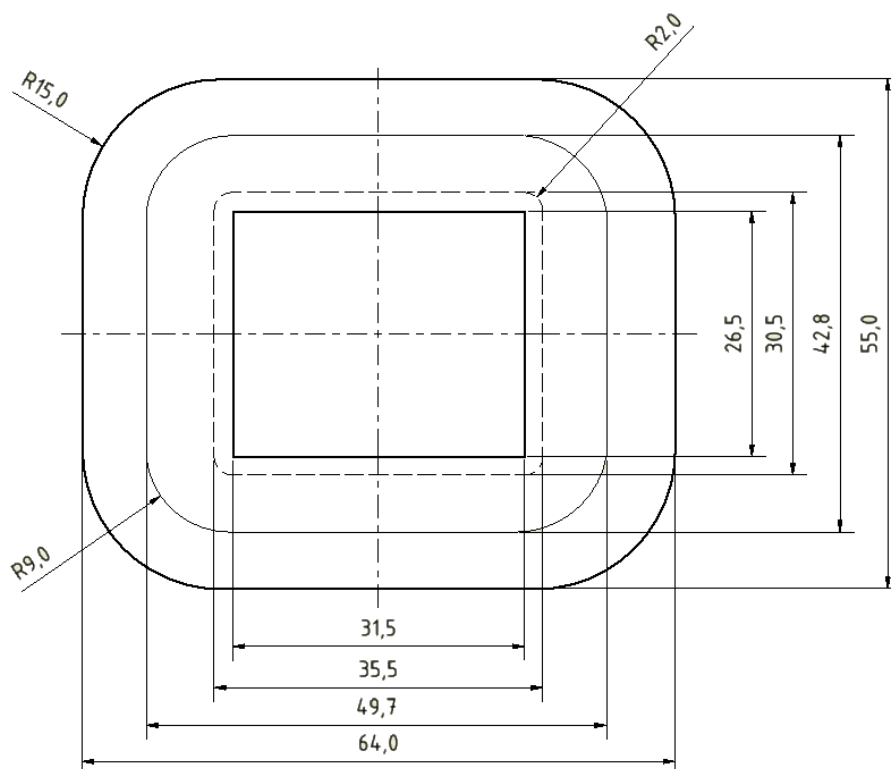
$$l_v = l_{vo} - 2 * t_{\check{c}k} = 37,5 - 2 * 2 = 33,5 \text{ mm} \quad (5-11)$$

Počet závitů na vrstvě  $N_l$  (činitel mezizávitové vůle se pohybuje mezi 1,10-1,12).

$$N_l = \frac{l_v}{1,12 * d_i} = \frac{33,5}{1,12 * 0,395} = 75,7 \doteq 76 \text{ závitů} \quad (5-12)$$

Počet vrstev  $n$ .

$$n = \frac{N}{N_l} = \frac{1040}{76} = 13,68 \doteq 14 [-] \quad (5-13)$$



**Obrázek 5-4 - Řez cívkou**

Tloušťka vinutí  $h_v$ .

$$h_v = n * (d_i + iz_m) = 14 * (0,395 + 0,2) = 8,33 \text{ mm} \quad (5-14)$$

Podle těchto údajů byl nakreslen průřez cívky (obrázek 5-4). Cívka se vejde do navrženého okna s vůlí asi 2 mm.

Střední délka závitu  $l_z$  (obrázek 5-4).

$$l_z = 2 * (26,5 * 31,5) + 2 * \pi * 6,16 = 154,73 \text{ mm} \quad (5-15)$$

Celková délka vinutí  $l_c$ .

$$l_c = N * l_z = 1040 * 154,73 * 10^{-3} \doteq 160,9 \text{ m} \quad (5-16)$$

Odpor vinutí při oteplení  $\theta = 60 \text{ K}$ . Měrný el. odpor  $\rho_{40}$  a teplotní činitel odporu  $\alpha_{40}$  byl odečten z tabulky 2-1 [2].

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho_{40}(1 + \alpha \theta) \frac{4 * l}{\pi * d_i^2} = 1,92 * 10^{-8}(1 + 0,0036 * 60) \frac{4 * 160,9}{\pi * 0,000395^2} = 30,66 \doteq 31 \Omega \quad (5-17)$$

Reaktance vinutí  $X_2$ .

$$X_2 = \omega * L_2 = 2 * \pi * 50 * 3,269 = 1027,23 \Omega \quad (5-18)$$

Impedance cívky  $Z_2$  v zapnutém stavu.

$$Z_2 = \sqrt{X_2^2 + R^2} = \sqrt{1027^2 + 31^2} = 1027 \Omega \quad (5-19)$$

Skutečná velikost proudu  $I_2$  bude zanedbatelně menší.

$$I_2 = \frac{1,1 * U}{Z_2} = \frac{1,1 * 220}{1027} = 0,235 \text{ A} \quad (5-20)$$

Indukčnost elektromagnetu při oddálené kotvě  $L_I$ , koeficient  $K_L$  odečteme z grafu 3-25 [2] pro křivku D.

$$\Sigma \delta = 22 \text{ mm}; S / \Sigma \delta = 3,12; K_L = 6; \mu_r = 2000; \mu_r * \mu_0 = 2,5 * 10^{-3};$$

$$L_1 = \frac{K_L * N^2 * S * \mu_r * \mu_0}{\mu_r * \Sigma \delta + l_{Fe}} = \frac{6 * 1040^2 * 7,5 * 10^{-4} * 2,5 * 10^{-3}}{2000 * 22 * 10^{-3} + 0,11442} = 0,252 \text{ H} \quad (5-21)$$

Reaktance  $X_I$  na počátku zátahu.

$$X_1 = \omega * L_1 = 2 * \pi * 50 * 0,252 = 79,4 \Omega \quad (5-22)$$

Odpovídající impedance  $Z_I$ .

$$Z_1 = \sqrt{X_1^2 + R^2} = \sqrt{79,4^2 + 31^2} = 85,1 = 86 \Omega \quad (5-23)$$

Proud  $I_I$  procházející cívkou při zapnutí.

$$I_1 = \frac{1,1 * U}{Z_1} = \frac{1,1 * 220}{86} = 2,84 \text{ A} \quad (5-24)$$

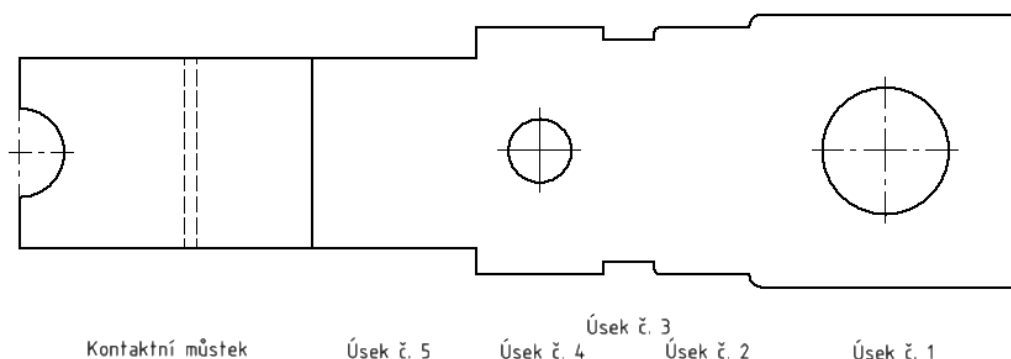


## 6 OTEPLENÍ JMENOVITÝM PROUDEM

Proudovodná dráha každého pólu ověřovaného stykače je souměrná podle roviny ve středu kontaktního můstku ve všech fázích. Výpočet stačí provést jen pro polovinu proudovodné dráhy a přírodních kabelů.

### 6.1 Odpory proudovodné dráhy

Proudovodná dráha byla rozdělena na několik menších úseků, aby mohly být vypočítány odpory jednotlivých částí.



Obrázek 6-1 - Rozdělení proudovodné dráhy

Aby byl určen měrný odpor dráhy bylo předpokládáno, že jejich oteplení je  $\theta = 50$  K a teplota okolí  $T_o = 40^\circ\text{C}$ . Odpor mědi byl vypočítán následovně:

$$\rho_{Cu} = \rho_{40} * (1 + \alpha\theta) = 1,92 * 10^{-8} * (1 + 0,0036 * 50) = 2,266 * 10^{-8} \Omega m \quad (6-01)$$

#### 6.1.1 Výpočet odporu šroubového spoje

Přítlačná síla spoje  $F_p$  je vyvolána šroubem M10, jehož průměr jádra je  $d_j = 10$  mm. Dovolené namáhání materiálu šroubu je  $\delta_d = 30\text{MPa}$ .

$$F'_p = \delta_d * \frac{\pi * d_j^2}{4} = 30 * 10^6 * \frac{\pi * (10 * 10^{-3})^2}{4} \doteq 2356 \text{ N} \quad (6-02)$$

Kvůli provozu stykače (otlačení ploch, roztažnost materiálu) se přítlačná síla zmenší zhruba o 30 %.

$$F_p = 0,7 * F'_p = 0,7 * 2356 \doteq 1649 \text{ N} \quad (6-03)$$

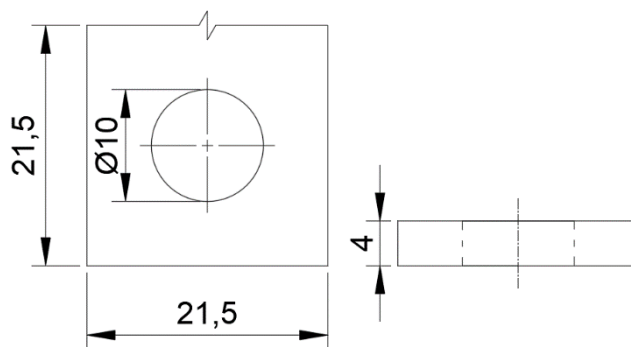
Odpor šroubového spoje  $R_s$  je plošný styk  $n = 1$  mědi a mědi, konstanta materiálu kontaktu byla zvolena  $k = 9 \cdot 10^{-3}$ .

$$R_s = \frac{k}{F_p^n} = \frac{9 \cdot 10^{-3}}{1649^1} = 5,46 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (6-04)$$

### 6.1.2 Výpočet odporu úseku č. 1

Průřez úseku č. 1  $S_1$ .

$$S_1 = 21,5 \cdot 4 = 86 \text{ mm}^2 \quad (6-05)$$



Obrázek 6-2 - Rozměry úseku č. 1

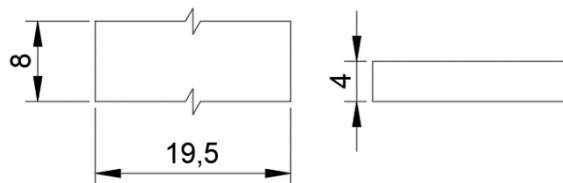
Jelikož se v úseku č. 1 nachází otvor o průměru  $d = 10$  mm muselo být uvažováno zvýšení odporu. Z obrázku 2-6 [2] byl odečten koeficient  $k = 1,7$ , který byl potřeba k výpočtu. Odpor úseku č. 1  $R_{U1}$ .

$$R_{U1} = \frac{\rho_{Cu}}{S_1} \cdot (l_1 - b + k \cdot b) = \frac{2,27 \cdot 10^{-8}}{86 \cdot 10^{-6}} \cdot (21,5 - 10 + 1,7 \cdot 10) \cdot 10^{-3} = 9,64 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (6-06)$$

### 6.1.3 Výpočet odporu úseku č. 2

Průřez úseku č. 2  $S_2$ .

$$S_2 = 19,5 \cdot 4 = 78 \text{ mm}^2 \quad (6-07)$$



Obrázek 6-3 - Rozměry úseku č. 2

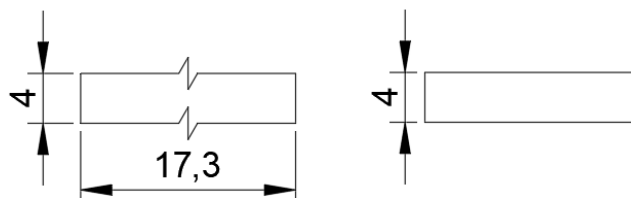
Odpor úseku č. 2  $R_{U2}$ .

$$R_{U2} = \frac{\rho_{Cu}}{S_2} * l_K = \frac{2,27 * 10^{-8}}{78 * 10^{-6}} * 8 * 10^{-3} = 2,33 * 10^{-6} \Omega \quad (6-08)$$

### 6.1.4 Výpočet odporu úseku č. 3

Průřez úseku č. 3  $S_3$ .

$$S_3 = 17,3 * 4 = 69,2 \text{ mm}^2 \quad (6-09)$$



Obrázek 6-4 - Rozměry úseku č. 3

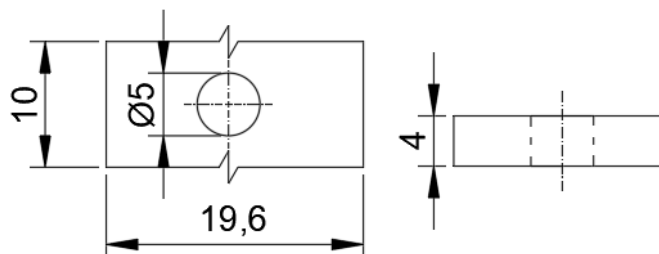
Odpor úseku č. 3  $R_{U3}$ .

$$R_{U3} = \frac{\rho_{Cu}}{S_3} * l_3 = \frac{2,27 * 10^{-8}}{69,2 * 10^{-6}} * 4 * 10^{-3} = 1,31 * 10^{-6} \Omega \quad (6-10)$$

### 6.1.5 Výpočet odporu úseku č. 4

Průřez úseku č. 4  $S_4$ .

$$S_4 = 19,6 * 4 = 78,4 \text{ mm}^2 \quad (6-11)$$



Obrázek 6-5 - Rozměry úseku č. 4

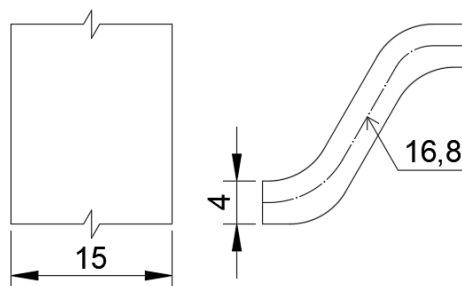
Odpor úseku č. 4  $R_{U4}$  byl počítán obdobně jako u úseku č. 1. Koeficient  $k = 1,35$

$$R_{U4} = \frac{\rho_{Cu}}{S_4} * (l_4 - b + k * b) = \frac{2,27 * 10^{-8}}{78,4 * 10^{-6}} * (10 - 19,6 + 1,35 * 19,6) * 10^{-3} = 4,87 * 10^{-6} \Omega \quad (6-12)$$

### 6.1.6 Výpočet odporu úseku č. 5

Průřez úseku č. 5  $S_5$ .

$$S_5 = 15 * 4 = 60 \text{ mm}^2 \quad (6-13)$$



**Obrázek 6-6 - Rozměry úseku č. 5**

Odpor úseku č. 5  $R_{U5}$ .

$$R_{U5} = \frac{\rho_{Cu}}{S_5} * l_5 = \frac{2,27 * 10^{-8}}{60 * 10^{-6}} * 16,8 * 10^{-3} = 6,35 * 10^{-6} \Omega \quad (6-14)$$

### 6.1.7 Výpočet odporu kontaktního styku

Z kapitoly 3.1. Přítlačná pružina byla vypočítána přítlačná síla na kontaktní můstek. Protože byl počítán odpor jednoho kontaktního styku, stačila jenom polovina přítlačné síly  $F_K$ . Polovina přítlačné síly  $F_{1K}$ .

$$F_{1K} = \frac{F_K}{2} = \frac{23}{2} = 11,5 \text{ N} \quad (6-15)$$

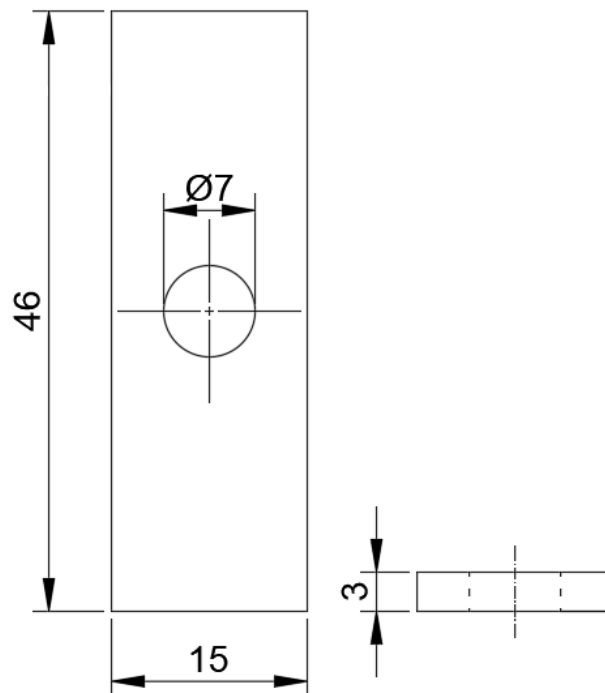
Pro výpočet stykového odporu  $R_s$  je potřeba znát materiálovou konstantu  $k = 3 * 10^{-4}$ , která se nachází v tabulce 2-9 [2]. V našem případě se jedná o přímý dotyk, bylo zvoleno  $n = 0,5$ .

$$R_s = k * F_{K1}^{-k} = 3 * 10^{-4} * 11,5^{-0,5} = 88,5 * 10^{-6} \Omega \quad (6-16)$$

### 6.1.8 Výpočet odporu kontaktního můstku

Průřez kontaktního můstku  $S_{KM}$ .

$$S_{KM} = 15 * 3 = 45 \text{ mm}^2 \quad (6-17)$$



**Obrázek 6-7 - Rozměry kontaktního můstku**

Odpor kontaktního můstku  $R_{KM}$  byl vypočítán obdobně jako na úseku č. 1.

$$R_{KM} = \frac{\rho_{Cu}}{S_{KU}} * (l_K - b + k * b) = \frac{2,27 * 10^{-8}}{45 * 10^{-6}} * (46 - 15 + 1,7 * 15) * 10^{-3} = 2,84 * 10^{-5} \Omega \quad (6-18)$$

Poněvadž je proudovodná dráha symetrická, tak stačila jenom půlka odporu kontaktního můstku  $R_{KM2}$ .

$$R_{KM2} = \frac{R_{KM}}{2} = \frac{2,84 * 10^{-5}}{2} = 1,42 * 10^{-5} \Omega \quad (6-19)$$

## 6.2 Náhradní schéma přívodu proudu

Oteplení přívodního vodiče bylo počítáno pro jeho tepelně nejmenší vhodný průřez. Podle tabulky 5-1 [2] by maximální průřez vodiče měl být  $115 \text{ mm}^2$ . Protože se naše výpočty ověřují měřením, byl zvolen přívodní kabel o průměru  $120 \text{ mm}^2$  a délce 2 m. Velikost dovoleného oteplení přívodního vodiče, podle normy ČSN 32 2000-4-43, pro termoplastickou nebo pryžovou izolaci je  $70^\circ\text{C}$ .

Přívodní měděný vodič o průřezu  $S_{Cu} = 120 \text{ mm}^2$  ( $\delta = 1,6 \text{ A/mm}^2$ ) má průměr  $d_{Cu} = 12,4 \text{ mm}$ . Tloušťka PVC izolace pro 500 V je asi 3 mm, z toho vyplývá,

že vnější průměr izolovaného vodiče  $d_i = 18,4$  mm. Nejméně příznivý stav pro vodiče je, když je ve svazku uložen vodorovně.

Obvod odvádějící teplo konvekcí  $O_k$ .

$$O_k = \pi * d_i = \pi * 18,4 * 10^{-3} = 57,8 * 10^{-3} \text{ m} \quad (6-20)$$

Vznikající teplo se odvádí po celém obvodu  $O_z$ .

$$O_z = \pi * d_i = 18,4 * 10^{-3} * \pi = 57,8 * 10^{-3} \text{ m} \quad (6-21)$$

Poměr obvodů.

$$\frac{O_z}{O_k} = \frac{S_z}{S_k} = \frac{57,8}{57,8} = 1 [-] \quad (6-22)$$

V důsledku okolních předmětů došlo ke zmenšení součinitele  $k_z$ , součinitel byl odhadnut na 0,9.

$$N = k_z * \frac{S_z}{S_k} = 0,9 * 1 = 0,9 [-] \quad (6-23)$$

Součinitel přestupu tepla z izolace do vzduchu  $\alpha_0$  v linearizovaném zápisu podle tabulky 2-44 [2]. Měrná chladivost konvekcí  $\alpha_k$  byla určena interpolací mezi  $\alpha_k = 0,05$  m a  $\alpha_k = 0,01$  m pro průměr  $d_i = 0,0184$  m.

$$\alpha_k(0,05\text{m}) = 4,3 + 0,055\theta_p$$

$$\alpha_k(0,01\text{m}) = 6 + 0,09\theta_p$$

$$\alpha_k = 5,643 + 0,0826\theta_p$$

Aby byla určena měrná chladivost zářením  $\alpha_z$  musel být zjištěn relativní činitel sálání neboli emisivitu  $E_z$ . Emisivita byla určena z tabulky 2-38 z literatury [2], pro černou izolaci kabelu byla zvolena  $E_z = 0,9$  a teplota okolí  $T_o = 40$  °C.

$$\alpha_z = 6,3 + 0,038\theta_p$$

Součinitel přestupu tepla z izolace do vzduchu je součet měrné chladivosti konvekcí a zářením s korekcí snížení záření  $N$ .

Součinitel přestupu tepla z izolace do vzduchu  $\alpha_0$ .

$$\alpha_0 = \alpha_k + N * \alpha_z = 5,643 + 9 * \theta_p + 0,7817 * (6,3 + 0,038 * \theta_p) = 11,31 + 0,1169 * \theta_p = A + B * \theta_p \quad (6-24)$$

Tepelný odpor izolačního pláště na  $l = 2$  m délky,  $d_{Cu} = 12,4$  mm,  $d_i = 18,4$  mm, tepelná vodivost izolace  $\lambda_{plast} = 0,3 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ , činitel zmenšení chladícího obvodu  $\eta$ .

$$\eta = \frac{360-0}{360} = 1 [-] \quad (6-25)$$

Tepelný odpor izolačního pláště  $R_{T1}$ .

$$R_{T1} = \frac{\ln \frac{d_i}{d_{Cu}}}{2\pi \lambda l \eta} = \frac{\ln \frac{18,4}{12,4}}{2\pi * 0,3 * 2 * 1} = 0,211 \text{ KW}^{-1} \quad (6-26)$$

$O_p$  je ochlazovací obvod, rozhraní mezi krajní izolační vrstvou a vzduchem.

$$O_p = O_k = 57,7 * 10^{-3} = 57,7 * 10^{-3} \text{ m} \quad (6-27)$$

Pomocná veličina  $K$  určuje vztah mezi oteplením povrchu izolace  $\theta_p$  a oteplením vodiče  $\theta_v$ .

$$K = O_p * l * R_{T1} = 57,7 * 10^{-3} * 2 * 0,211 = 0,0244 [-] \quad (6-28)$$

Oteplení povrchu izolace  $\theta_p$  pro maximální povolené oteplení přírodního vodiče  $\theta_v = 20 \text{ K}$  (při maximální teplotě okolí  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$$\begin{aligned} \theta_p = - \left( \frac{1 + AK}{2BK} \right) + \sqrt{\left( \frac{1 + AK}{2BK} \right)^2 + \frac{\theta_v}{BK}} = - \left( \frac{1 + 11,31 * 0,0244}{2 * 0,1169 * 0,0244} \right) + \\ + \sqrt{\left( \frac{1 + 11,31 * 0,0244}{2 * 0,1169 * 0,0244} \right)^2 + \frac{20}{0,1169 * 0,0244}} = 15,16 \text{ K} \end{aligned} \quad (6-29)$$

Měrná chladivost povrchu izolace  $\alpha_0$ .

$$\alpha_0 = A + B * \theta_p = 11,31 + 0,1169 * 15,16 = 13,08 \text{ WK}^{-1} \text{ m}^{-1} \quad (6-30)$$

Aby byla zjištěna náhradní měrná chladivost na povrchu vodiče  $\alpha_{0n}$ , musel být vypočítán obvod vodiče  $O_v$ .

$$O_v = \pi * d_{Cu} = \pi * 12,4 * 10^{-3} = 38,8 * 10^{-3} \text{ m} \quad (6-31)$$

Náhradní měrná chladivost na povrchu vodiče  $\alpha_{0n}$ .

$$\alpha_{0n} = \frac{1}{O_v * l * \left( R_{T1} + \frac{1}{\alpha_0 * O_p * l} \right)} = \frac{1}{38,8 * 10^{-3} * 2 * \left( 0,211 + \frac{1}{13,08 * 57,8 * 10^{-3} * 2} \right)} = 14,75 \text{ WK}^{-1} \text{ m}^{-2} \quad (6-32)$$

K určení veličiny náhradního tepelného schématu přívodu proudu bylo vycházeno z předpokladu, že se jedná o tepelně dlouhou tyč, u které nedochází k výměně tepla mezi jejími konci.

Pomocná veličina  $\delta$ .

$$\delta = \sqrt{\alpha_{0n} * O_v * \lambda_{Cu} * S_{Cu}} = \sqrt{14,75 * 38,8 * 10^{-3} * 385 * 120 * 10^{-6}} = 0,1627 [-] \quad (6-33)$$

Výpočet příčné (transversální) složky  $R_{Tt}$ .

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{0,1377} = 6,15 \text{ KW}^{-1} \quad (6-34)$$

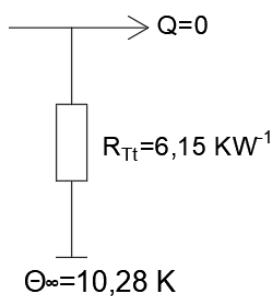
Oteplení koncového bodu  $\theta_{\infty}$ .

$$\theta_{\infty} = \frac{\rho_{Cu} * I^2}{\alpha_{0n} * O_v * S_{Cu}} = \frac{1,96 * 10^{-8} * 190^2}{14,75 * 38,8 * 10^{-3} * 120 * 10^{-6}} \doteq 10,28 \text{ K} \quad (6-35)$$

Pro maximální dovolené oteplení přívodu s izolací z PVC byl stanoven měrný odpor měděného vodiče  $\rho_{Cu}$ .

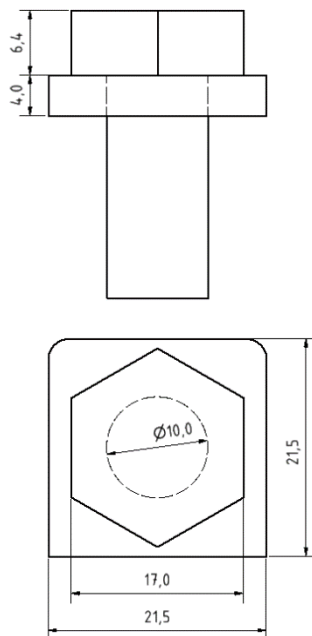
$$\rho_{Cu} = \rho_{40}(1 + \alpha\theta) = 1,82 * 10^{-8}(1 + 3,8 * 10^{-3} * 20) = 1,96 * 10^{-8} \Omega m \quad (6-36)$$

Přívod proudu v náhradním tepelném schématu je znázorněn takto:



Obrázek 6-8 - Náhradní schéma přívodu proudu

### 6.3 Náhradní schéma svorkového spoje



Obrázek 6-9 - Šroub v úseku č. 1



Činitel přestupu tepla mezerou v okolí kontaktních stykových plošek  $c$  byl odečten z tabulky 2-58 [2]. Velikost stykové plochy  $S = 2,27 \text{ cm}^2$ , bylo vycházeno z předpokladu, že se jedná o šroub M10 s průměrem hlavy 17 mm.

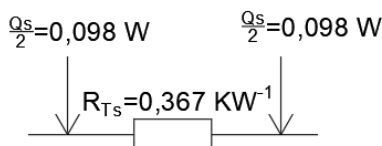
$$c = 0,5 + (3,83 - 5) * \frac{0,8-0,5}{5-1} = 0,587 [-] \quad (6-37)$$

Styk je tvořen z mědi při oteplení o 50 K.

$$R_{Ts} = \frac{c * R_{\xi}}{2} * \left( \frac{1}{\lambda_{Cu} * \varrho_{Cu}} + \frac{1}{\lambda_{Cu} * \varrho_{Cu}} \right) = \frac{0,587 * 5,46 * 10^{-6}}{385 * 2,265 * 10^{-8}} = 0,367 \text{ KW}^{-1} \quad (6-38)$$

Ztráty ve styku.

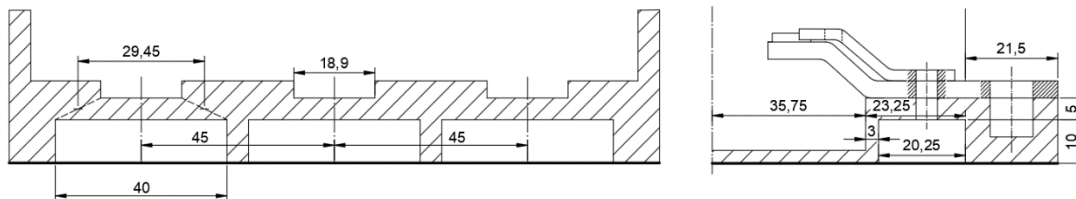
$$Q_{S/2} = \frac{1}{2} * R_{\xi} * I^2 = \frac{1}{2} * 5,46 * 10^{-6} * 190^2 = 0,098 \text{ W} \quad (6-39)$$



**Obrázek 6-10 - Náhradní schéma šroubového spoje**

## 6.4 Náhradní schéma přívodního pásku

Proudovodná dráha se nachází ve dvou různých chladících prostředích, proto její výpočet musel být rozdělen na dvě části (obrázek 6-11). První část proudovodné dráhy se nachází vně přístroje a teplo z ní přestupuje přímo do okolního vzduchu.



**Obrázek 6-11 - Průřez stykačem**

Druhá část proudovodné dráhy je uvnitř přístroje. Bylo uvažováno, že odvod tepla je jen směrem ke stěně panelu. Tepelný tok prochází (uvažujeme zjednodušené útvary) plochou  $29,45 \times 23,25 \text{ mm}$ , tloušťkou bakelitu  $l_b = 5 \text{ mm}$  a tloušťkou vzduchové mezery  $\delta = 10 \text{ mm}$  a přes ocelový plech přestupuje do atmosféry.

### 6.4.1 První část přívodního pásku

Sousední svorky fází se vzájemně stíní, činitel  $K$  byl odhadnut na 0,7. Jejich povrch je kovově lesklý,  $E_z = 0,4$ ;  $T_o = 40$  °C. Pro předpokládané oteplení  $\theta_p = 50$  K, podle tabulky 2-44 [2], byla zjištěna měrná chladivost zářením  $\alpha_z$ .

$$\alpha_z = 2,8 + 0,017\theta_p = 2,8 + 0,017 * 50 = 3,65 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (6-40)$$

Za výšku  $h$  (měnící se od 8 do 14 mm) byla dosazena střední hodnota  $\approx 11$  mm. Nadhodnocení chladících poměrů bylo kompenzováno zanedbáním ostatních ploch. Měrná chladivost konvekci  $\alpha_k$  byla určena interpolací z tabulky 2-44 [2].

$$\alpha_k = 5,96 + 0,089 * \theta_p = 5,96 + 0,089 * 50 = 10,41 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (6-41)$$

Výsledná měrná chladivost  $\alpha_o$ .

$$\alpha_o = N\alpha_z + \alpha_k = 0,7 * 3,65 + 10,41 = 12,97 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (6-42)$$

Chladící povrch  $P_v$ .

$$P_v = (21,5 + 4 + 4) * 21,5 + 21,5 * 4 = 699 * 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (6-43)$$

Chladící obvod  $O_v$  při průřezu  $S_v = 86 * 10^{-6} \text{ m}^2$  na délce  $l_v = 21,5 * 10^{-3} \text{ m}$ .

$$O_v = \frac{P_v}{l_v} = \frac{699 * 10^{-6}}{21,5 * 10^{-3}} = 32,5 * 10^{-3} \text{ m} \quad (6-44)$$

Náhradní veličiny  $\pi$  – článku.

Pomocná veličina  $\beta l$  podle které bylo určeno, jestli se jedná o tepelně „krátkou“ nebo „dlouhou“ tyč. Pokud je  $\beta l < 0,1$ , jedná se o tepelně „krátkou“ tyč, kde  $\sinh \beta l \approx \tanh \beta l \doteq \beta l [\text{rad}]$ . [2]

$$\beta l = l * \sqrt{\frac{\alpha_o * O_v}{\lambda_{Cu} * S_v}} = 21,5 * 10^{-3} * \sqrt{\frac{12,97 * 32,5 * 10^{-3}}{385 * 86 * 10^{-6}}} = 0,0767 [-] \quad (6-45)$$

Z výpočtu vyšlo, že se jedná o tepelně „krátkou“ tyč.

Podélná (longitudinální) složka  $R_{Tl}$ .

$$R_{Tl} \approx \frac{1}{\lambda_{Cu}} \frac{l_v}{S_v} = \frac{1}{385} \frac{21,5 * 10^{-3}}{86 * 10^{-6}} = 0,65 \text{ KW}^{-1} \quad (6-46)$$

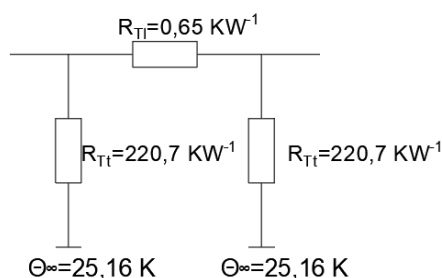
Příčná (transversální) složka  $R_{Tt}$

$$R_{Tt} \approx \frac{2}{\alpha_o * P_v} = \frac{2}{12,97 * 699 * 10^{-6}} = 200,7 \text{ KW}^{-1} \quad (6-47)$$

Oteplení koncového bodu  $\theta_\infty$ .

$$\theta_\infty = \frac{R_{U1} * I^2}{\alpha_o * P_v} = \frac{9,64 * 10^{-6} * 190^2}{12,97 * 699 * 10^{-6}} = 25,16 \text{ K} \quad (6-48)$$

Náhradní schéma  $\pi$ -článku:



Obrázek 6-12 - Náhradní schéma první části přívodního pásku

## 6.4.2 Druhá část přívodního pásku

Druhá část přívodního pásku se skládá z úseku 2, 3, 4 a 5.

Povrchem  $P_v$  se odvádí teplo vznikající na úsecích 2,3 a 4 skrz bakelit o střední tloušťce  $S_b$  a vzduchovou vrstvou o ploše  $S_v$ .

$$P_V = O_V * l_v = \left( \frac{19,5+17,3+19,6}{3} + 4 + 4 \right) * 26 * 10^{-6} \doteq 706 * 10^{-6} m^2 \quad (6-49)$$

$$S_b = 26 * \frac{18,9+40}{2} * 10^{-6} = 776 * 10^{-6} m^2 \quad (6-50)$$

$$S_v = 23 * 40 * 10^{-6} = 930 * 10^{-6} m^2 \quad (6-51)$$

Tepelný odpor bakelitu, kde  $l_b$  je tloušťka bakelitu.

$$R_{Tb} = \frac{l_b}{\lambda_b * S_b} = \frac{5 * 10^{-3}}{0,25 * 776 * 10^{-6}} = 26 KW^{-1} \quad (6-52)$$

Tepelný odpor vzduchové mezery při emisivitě bakelitu  $E_{z1} = 0,8$  a plechu  $E_{z2} = 0,8$  je činitel vzájemného vyzařování  $E_{z12}$ .

$$E_{z12} = \frac{1}{\frac{1}{E_{z1}} + \frac{1}{E_{z2}} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1} = 0,667 [-] \quad (6-53)$$

Předběžným výpočtem byla stanovena tepelná vodivost vzduchu  $\lambda'_{efv}$ .

$$\lambda'_{efv} \approx 1,1 * \delta^{0,75} + 9 * E_{z12} * \delta = 1,1 * 0,01^{0,75} + 9 * 0,667 * 0,01 = 0,0948 KW^{-1} \quad (6-54)$$

Tepelný odpor vzduchové vrstvy  $R_{Tv}$ , kde  $l_v$  je délka vzduchové mezery.

$$R_{Tv} = \frac{l_v}{\lambda'_{efv} * S_v} = \frac{0,01}{0,0948 * 930 * 10^{-6}} = 113 KW^{-1} \quad (6-55)$$

Měrná tepelná vodivost ocelového plechu je o více jak dva řády vyšší než u bakelitu či vzduchu. O řád menší je tepelný odpor ocelového plechu, který je při řazení do série s těmito izolanty zcela zanedbatelný.

Chladihost stěny panelu při  $T_o = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $E_z = 0,8$ ;  $N = 1$ .

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= \alpha_k + N * \alpha_z = 3,127 + 0,032 * \theta_p + 1 * (5,6 + 0,034 * \theta_p) \\ &= 8,727 + 0,066 * \theta_p = A + B * \theta_p\end{aligned}$$

Chladící povrch  $P_p$ .

$$P_p = 23 * 40 * 10^{-6} = 0,930 * 10^{-6} m^2 \quad (6-56)$$

Pomocná veličina  $K$ .

$$K = O * l * \sum R_T = P_p * (R_{Tb} + R_{Tv}) = 0,93 * 10^{-6} * (26 + 113) = 0,1293 [-] \quad (6-57)$$

Oteplení povrchu  $\theta_p$  pro předpokládané oteplení pásku  $\theta_v = 50$  K.

$$\begin{aligned}\theta_p &= -\frac{1+AK}{2BK} + \sqrt{\left(\frac{1+AK}{2BK}\right)^2 + \frac{\theta_v}{BK}} = -\frac{1+8,727*0,1293}{2*0,066*0,1293} + \\ &\sqrt{\left(\frac{1+8,727*0,1293}{2*0,066*0,1293}\right)^2 + \frac{50}{0,066*0,1293}} = 21,62 K\end{aligned} \quad (6-58)$$

Výsledná měrná chladivost  $\alpha_0$ .

$$\alpha_0 = A + B * \theta_p = 8,727 + 0,066 * 21,62 = 10,15 Wm^{-2}K^{-1} \quad (6-59)$$

Přepočet efektivní vodivosti vzduchu pro odhadnutou chladivost povrchu.

Procházející ustálený tepelný tok  $Q$  chladícím povrchem  $P_p$ .

$$Q = \alpha_0 * P_p * \theta_p = 10,15 * 0,93 * 10^{-3} * 21,62 = 0,2041 W \quad (6-60)$$

Teplota na kraji vzduchové mezivrstvy  $T_2$ .

$$T_2 = T_0 + \theta_p = 40 + 11,62 = 61,62^\circ C = 61,62 + 273,15 = 334,77 K \quad (6-61)$$

Teplota na kraji vzduchové mezivrstvy .

$$\begin{aligned}T_1 &= T_2 + Q * R_{Tv} = 61,62 + 0,2041 * 113 = 84,68^\circ C = 84,68 + 273,15 = \\ &357,83 K\end{aligned} \quad (6-52)$$

Střední teplota plynu  $T_s$ , v tomto případě vzduchu.

$$T_s = 0,5 * (T_1 + T_2) = 0,5 * (84,68 + 61,62) = 73,15^\circ C \quad (6-63)$$

Z grafu 2-45 nebo tabulky 2-46 z literatury [2] byla odečtena materiálová konstanta  $C_v$ . Skutečná tepelná vodivost vzduchu  $\lambda_{ev}$  při konstantní tloušťce  $\delta = 0,01$  m.

$$\begin{aligned}\lambda_{ev} &= C_v * \delta^{0,75} * (T_1 - T_2)^{0,25} = 0,458 * 0,01^{0,75} * (84,68 - 61,62)^{0,25} = \\ &0,0243 Wm^{-2}K^{-1}\end{aligned} \quad (6-64)$$

Měrná chladivost  $\alpha_z$  povrchu sálá do prostoru přes uzavřenou plochou.

$$\begin{aligned}\alpha_z &= 5,7 * 10^{-8} * E_{z12} * (T_1^2 + T_2^2) * (T_1 + T_2) = 5,7 * 10^{-8} * 0,667 * \\ &(357,83^2 + 334,77^2) * (357,83 + 334,77) = 6,32 Wm^{-2}K^{-1}\end{aligned} \quad (6-65)$$

Efektivní tepelná vodivost vzduchu  $\lambda_{efv}$  při konstantní tloušťce  $\delta = 0,01$  m.

$$\lambda_{efv} = \lambda_{ev} + \alpha_z * \delta = 0,0243 + 6,32 * 0,01 = 0,08755 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (6-66)$$

Chyba předběžného výpočtu.

$$\Delta = \frac{\lambda'_{efv} - \lambda_{efv}}{\lambda_{efv}} * 100 = \frac{0,0948 - 0,08755}{0,08755} * 100 = 8,25 \% \quad (6-67)$$

Jelikož chyba předběžného výpočtu měla být  $|\Delta| \% < 5 \%$ , musel se provést celý výpočet od tepelného odporu vzduchové vrstvy znovu, místo  $\lambda'_{efv}$  byla dosazována vypočtená (přesnější) hodnota  $\lambda_{efv}$ .

Celý přepočten zde není uveden, přepočtené hodnoty jsou uvedeny níže:

$$\begin{aligned} R_{Tv} &= 123 \text{ KW}^{-1} & K &= 0,1386 [-] & \theta_p &= 20,83 \text{ K} \\ \alpha_0 &= 10,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} & Q &= 0,1957 \text{ W} & T_2 &= 60,83 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_1 &= 84,9 \text{ }^\circ\text{C} & T_s &= 72,87 \text{ }^\circ\text{C} & C_v &= 0,459 \\ \lambda_{ev} &= 0,02659 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} & \alpha_z &= 6,3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} & \lambda_{efv} &= 0,08959 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \\ |\Delta| &= 2,28 \% \end{aligned}$$

Chyba je menší než 5 %, proto výpočet pokračuje dále.

Náhradní chladiivost  $\alpha_{0n}$ .

$$\alpha_{0n} = \frac{1}{P_v * \left( \sum R_T + \frac{1}{\alpha_0 * P_p} \right)} = \frac{1}{706 * 10^{-6} * \left( 26 + 123 + \frac{1}{10,1 * 0,93 * 10^{-3}} \right)} = 5,54 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (6-68)$$

Dále byla vypočtena  $\beta l$ , kde průřez pásku  $S_I = 75,6 * 10^{-6} \text{ m}^2$ ,  $S_I$  jsou zprůměrovány úseky drah, aby se zjistilo jestli se jedná o tepelně “dlouhou” nebo “krátkou” tyč. Je-li  $\beta l \leq 0,1$ , jedná se o tepelně “krátkou” tyč.

$$\beta l = l_v * \sqrt{\frac{\alpha_{0n} * O_v}{\lambda_{Cu} * S_I}} = 0,0263 * \sqrt{\frac{5,54 * 0,0268}{385 * 75,6 * 10^{-6}}} = 0,0495 [-] \quad (6-69)$$

Jelikož se jedná o “tepelně” krátkou tyč, bylo rovnou přejito k výpočtu náhradního  $\pi$  – článku.

Výpočet podélné složky  $R_{Tl}$ .

$$R_{Tl} = \frac{l_v}{\lambda_{Cu} * S_I} = \frac{0,0263}{385 * 75,6 * 10^{-6}} = 0,7509 \text{ KW}^{-1} \quad (6-70)$$

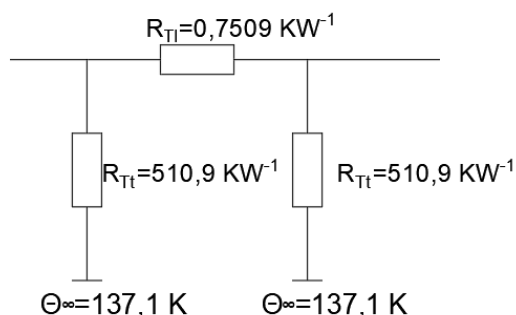
Výpočet příčné složky  $R_{Tt}$ .

$$R_{Tt} = \frac{2}{\alpha_{0n} * P_v} = \frac{2}{5,54 * 706 * 10^{-6}} = 510,92 \text{ KW}^{-1} \quad (6-71)$$

Oteplení koncových bodů příčných větví  $\theta_\infty$ .

$$\theta_{\infty} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{0n} \cdot P_v} = \frac{14,9 \cdot 10^{-6} \cdot 190^2}{5,54 \cdot 706 \cdot 10^{-6}} = 137,11 \doteq 137 \text{ K} \quad (6-72)$$

Výsledné náhradní schéma:



**Obrázek 6-13 - Náhradní schéma druhé části přívodního pásku**

## 6.5 Náhradní schéma hlavního kontaktu

Hlavní kontakty stykače jsou nejspíše ze slitiny stříbra. Pro výpočet byly uvažovány čistě stříbrné kontakty s čelním přímkovým stykem. Plocha kontaktu  $S = 135 \text{ mm}^2$  a činitel vlivu přestupu tepla  $c = 0,77 [-]$  byl odečteny z tabulky 2–58 [2].

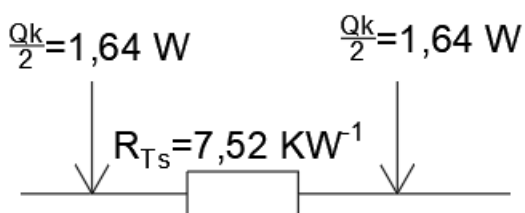
Tepelný odpor styku  $R_{Ts}$  při oteplení  $\theta = 50 \text{ K}$ .

$$R_{Ts} = \frac{c \cdot R_s}{\lambda_{Ag} \cdot \varrho_{Ag} \cdot (1 + \alpha \cdot \theta)} = \frac{0,77 \cdot 88,5 \cdot 10^{-6}}{418 \cdot 1,82 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0038 \cdot 50)} = 7,69 \text{ KW}^{-1} \quad (6-73)$$

Ztráty ve styku  $Q_k$ .

$$Q_{k/2} = \frac{1}{2} \cdot R_s \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot 88,5 \cdot 10^{-6} \cdot 190^2 = 1,64 \text{ W} \quad (6-74)$$

Náhradní schéma kontaktu:

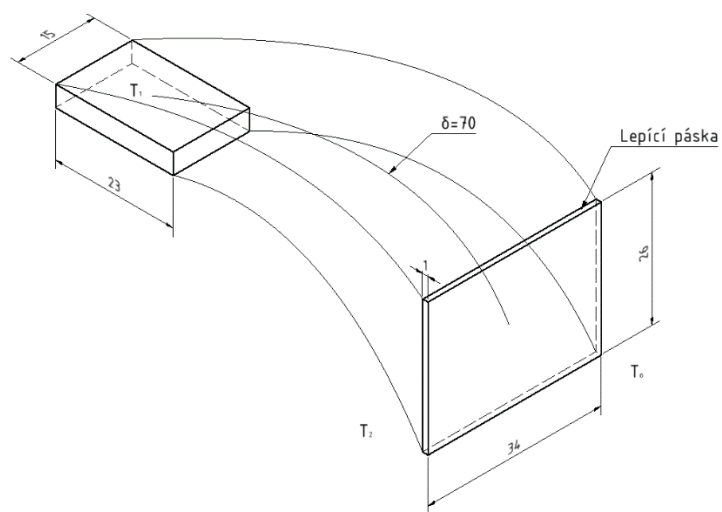


**Obrázek 6-14 - Náhradní schéma kontaktního spoje**

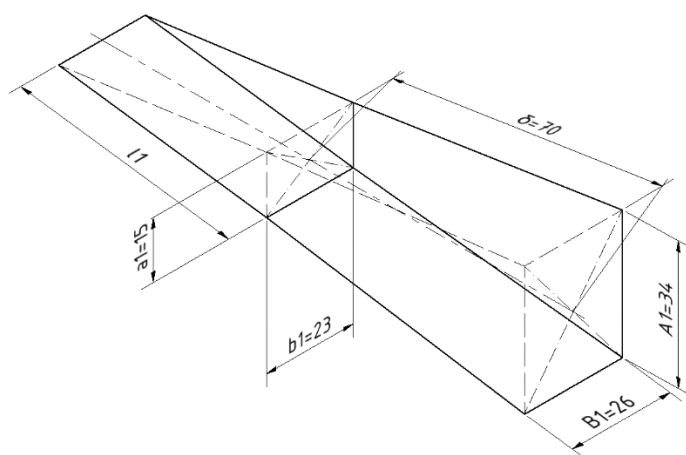
## 6.6 Náhradní schéma kontaktního můstku

Z poloviny kontaktního můstku přes vzduchovou mezeru nepravidelného kónického tvaru a přes bakelitovou stěnu (při výpočtu místo bakelitu uvažujeme

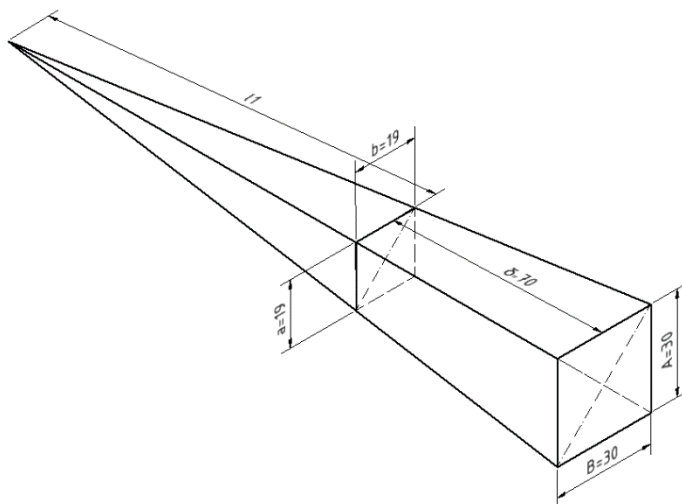
stříbrnou lepicí pásku, která byla použita při měření) o rozměrech 35 x 40 mm vystupuje tepelný tok do okolí.



**Obrázek 6-15 - Náhradní schéma kontaktního můstku**



**Obrázek 6-16 - Plochý kolmý jehlan**



**Obrázek 6-17 - Zjednodušený kolmý jehlan**

Nepravidelný kónický tvar byl pro zjednodušení výpočtů postupně zidealizován z nepravidelného (obrázek 6-17) na pravidelný kolmý jehlan (6-19). Výška jehlanu  $\delta$  představuje střední vzdálenost mezi můstkem a stěnou ze stříbrné lepicí pásky.

Zjednodušení bylo provedeno aritmetickým průměrem  $A_1$  a  $B_1$ . Stejně zjednodušení bylo použito i u  $a_1$  a  $b_1$ .

$$A = B = \frac{A_1 + B_1}{2} = \frac{40 + 35}{2} = 37,5 \text{ mm} \quad (6-75)$$

$$a = b = \frac{a_1 + b_1}{2} = \frac{15 + 23}{2} = 19 \text{ mm} \quad (6-76)$$

Vzdálenost vrcholu jehlanu  $l_1$  od „můstku“.

$$l_1 = \frac{\delta \cdot a}{A - a} = \frac{48 \cdot 19}{37,5 - 19} = 49,3 \text{ mm} \quad (6-78)$$

Emisivita oxidovaného vodiče  $E_{z1} = 0,4$  a emisivita kobercové pásky  $E_{z2} = 0,4$  byla odečtena z tabulky 2-38 [2].

$$E_{z12} = \frac{1}{\frac{1}{E_{z1}} + \frac{1}{E_{z2}} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,4} + \frac{1}{0,4} - 1} = 0,25 [-] \quad (6-79)$$

Přibližný výpočet efektivní vodivosti vzduchové vrstvy.

$$\lambda'_{efv} \approx 1,1 \cdot \delta^{0,75} + 9 \cdot E_{z12} \cdot \frac{l_1 \cdot \delta}{\delta + l_1} = 1,1 \cdot 0,048^{0,75} + 9 \cdot 0,25 \cdot \frac{49,3 \cdot 48 \cdot 10^{-6}}{(48 + 49,3) \cdot 10^{-3}} = 0,167 \text{ Wm}^{-1} \text{K}^{-1} \quad (6-80)$$

Tepelný odpor vzduchové vrstvy  $R_{Tv}$ .

$$R_{Tv} = \frac{(\delta + l_1) \cdot \delta}{\lambda'_{efv} \cdot A \cdot B \cdot l} = \frac{(48 + 49,3) \cdot 48 \cdot 10^{-6}}{0,167 \cdot 37,5 \cdot 37,5 \cdot 49,3 \cdot 10^{-9}} = 402,14 \text{ KW}^{-1} \quad (6-81)$$

Tepelný odpor stěny ze stříbrné pásky  $l_b = 1 \text{ mm}$ ,  $S_b = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$



$$S_b = A * B = 37,5 * 37,5 \doteq 1,41 * 10^{-3} m \quad (6-82)$$

$$R_{Tb} = \frac{l_b}{\lambda_b * S_b} = \frac{0,001}{0,25 * 1,41 * 10^{-3}} = 2,84 KW^{-1} \quad (6-83)$$

Činitel přestupu tepla z povrchu kobercové pásky do okolí, kde  $h = l_l + \delta = 0,57m$ ,  $T_o = 40\text{ }^{\circ}C$ ,  $E_z = 0,4$ ,  $N \approx 0,7$ . Z tabulky 2–44 [2] byla odečtena měrná chladivost zářením  $\alpha_z$  a konvekcí  $\alpha_k$ .

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \alpha_k + N * \alpha_z = 3,73 + 0,046 * \theta_p + 0,7 * (2,8 + 0,017 * \theta_p) \\ &= 6,53 + 0,0634 * \theta_p = A + B * \theta_p \end{aligned}$$

Pomocná veličina  $K$ .

$$K = O * l * \sum R_T = S_b * (R_{Tb} + R_{Tv}) = 1,41 * 10^{-3} * (2,84 + 40214) = 0,569 [-] \quad (6-84)$$

Oteplení vodiče bylo zvoleno  $\theta_v = 50\text{ K}$ .

Výpočet oteplení povrchu vodiče  $\theta_p$ .

$$\begin{aligned} \theta_p &= -\frac{1+AK}{2BK} + \sqrt{\left(\frac{1+AK}{2BK}\right)^2 + \frac{\theta_v}{BK}} = -\frac{1+6,53*0,569}{2*0,0634*0,569} + \\ &\sqrt{\left(\frac{1+6,53*0,569}{2*0,0634*0,569}\right)^2 + \frac{50}{0,0634*0,569}} = 9,85\text{ K} \end{aligned} \quad (6-85)$$

Měrná chladivost  $\alpha_0$ .

$$\alpha_0 = A + B * \theta_p = 6,53 + 0,0634 * 9,85 = 7,16\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Přepočet efektivní vodivosti vzduchu pro odhadnutou chladivost povrchu.

Ustálený tepelný tok  $Q$ , procházející chladícím povrchem  $S_b$ .

$$Q = \alpha_0 * S_b * \theta_p = 7,16 * 1,41 * 10^{-3} * 9,85 = 0,0992\text{ W} \quad (6-86)$$

Přepočet efektivní vodivosti vzduchu.

Teplota  $T_2$  vně stykače.

$$\begin{aligned} T_2 &= T_0 + \theta_p + Q * R_{Tb} = 40 + 9,85 + 0,0992 * 2,844 = 50,1^{\circ}C = 50,1 + \\ &273,15 = 323,25\text{ K} \end{aligned} \quad (6-87)$$

Teplota  $T_1$  na povrchu kontaktního můstku.

$$\begin{aligned} T_1 &= T_2 + Q * R_{Tv} = 50,1 + 0,0992 * 402,14 = 90,1^{\circ}C = 90,1 + 273,15 = \\ &363,15\text{ K} \end{aligned} \quad (6-88)$$

Střední teplota  $T_s$  vzduchu.

$$T_s = 0,5 * (T_1 + T_2) = 0,5 * (90,1 + 50,1) = 70,5^{\circ}C \quad (6-89)$$

Měrná chladivost sáláním  $\alpha_z$  do volného prostoru.

$$\alpha_z = 5,7 * 10^{-8} * E_{z12} * (T_1^2 + T_2^2) * (T_1 + T_2) = 5,7 * 10^{-8} * 0,25 * (363,15^2 + 323,25^2) * (363,15 + 323,15) = 2,31 W/m^2 K \quad (6-90)$$

Materiálová konstanta  $C_v = 0,448$  byla určena z grafu 2-45 [2].

$$\lambda_{efv} = C_v * \delta^{0,75} * (T_1 - T_2)^{0,25} + \alpha_z * \frac{l_1 * \delta}{\delta + l_1} = 0,448 * (0,048)^{0,75} * (90 - 50,1)^{0,25} + 2,31 * \frac{49,3 * 48 * 10^{-6}}{(48 + 49,3) * 10^{-3}} = 0,1716 m^{-2} K^{-1} \quad (6-91)$$

Bylo provedeno porovnání  $\lambda'_{efv}$  a  $\lambda_{efv}$ . Odchylka vyšla pod 5 %, takže bylo možné dále pokračovat ve výpočtu.

$$\Delta = \frac{\lambda'_{efv} - \lambda_{efv}}{\lambda_{efv}} * 100 = \frac{0,1675 - 0,1716}{0,1716} * 100 = 2,42 \% \quad (6-92)$$

Za chladicí povrch  $P_v$  kontaktního můstku bylo považováno čelo, boky a vrch můstku.

$$P_v = (15 + 3 + 3) * 23 + 15 * 3 = 528 * 10^{-6} m^2 \quad (6-93)$$

Náhradní měrná chladivost  $\alpha_{0n}$  na povrchu kontaktního můstku.

$$\alpha_{0n} = \frac{1}{P_v * (\sum R_T + \frac{1}{\alpha_0 * S_b})} = \frac{1}{528 * 10^{-6} * (2,84 + 402,1 + \frac{1}{7,16 * 1,4 * 10^{-3}})} = 3,75 W/m^2 K \quad (6-94)$$

Výpočtem bylo zjištěno, jestli se jedná o tepelně krátkou nebo dlouhou tyč.

$$\beta l = l_v * \sqrt{\frac{\alpha_{0n} * Q_v}{\lambda_{Cu} * S_I}} = 0,023 * \sqrt{\frac{3,75 * 0,021}{385 * 45 * 10^{-6}}} = 0,049 W m^{-2} K^{-1} \quad (6-95)$$

Jedná se o tepelně krátkou tyč, jelikož  $\beta l < 0,1$ .

Výpočet podélné složky  $R_{Tl}$ .

$$R_{Tl} = \frac{l_v}{\lambda_{Cu} * S_I} = \frac{0,023}{385 * 45 * 10^{-6}} = 1,327 KW^{-1} \quad (6-96)$$

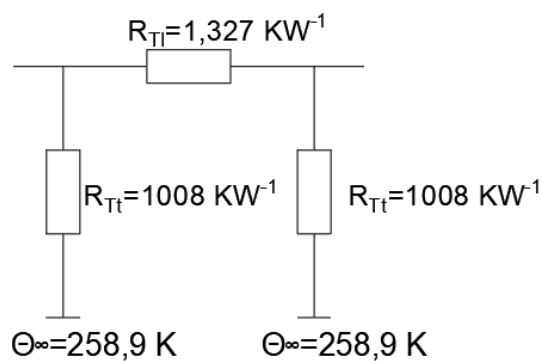
Výpočet příčné složky  $R_{Tt}$ .

$$R_{Tt} = \frac{2}{\alpha_{0n} * P_v} = \frac{2}{3,75 * 528 * 10^{-6}} = 1008 K/W \quad (6-97)$$

Oteplení koncových bodů příčných větví  $\theta_{\infty}$ .

$$\theta_{\infty} = \frac{R_{KM2} * I^2}{\alpha_{0n} * P_v} = \frac{14,2 * 10^{-6} * 190^2}{3,75 * 528 * 10^{-6}} = 258,9 K \quad (6-98)$$

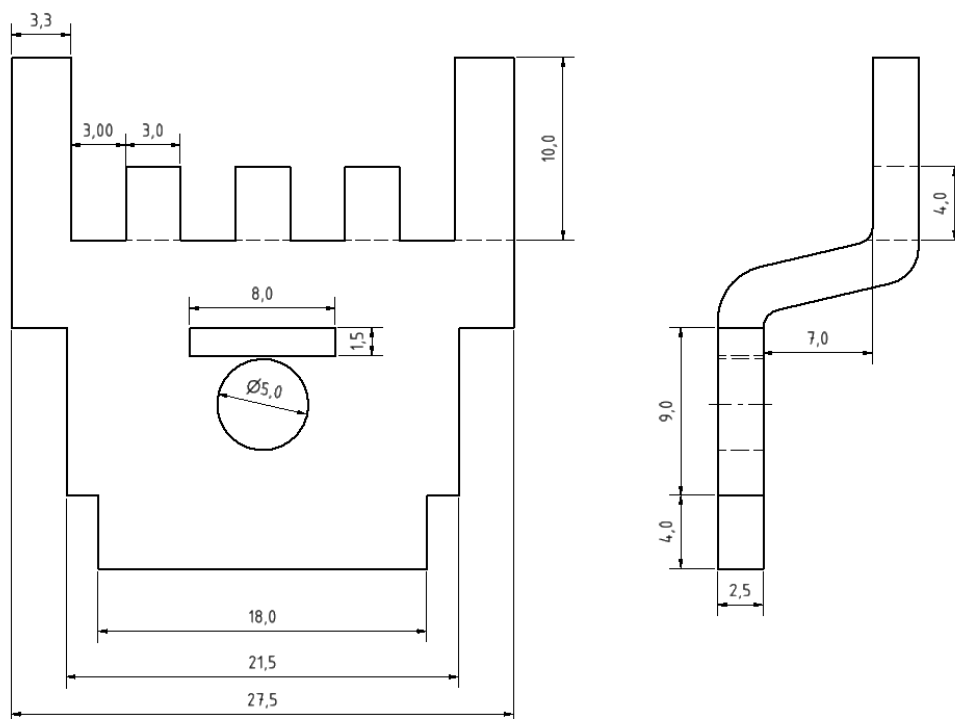
Náhradní schéma kontaktního můstku:



Obrázek 6-18 - Náhradní schéma kontaktního můstku

## 6.7 Chladič – opalovací kontakt

Na druhé části přívodního pásku je umístěn opalovací kontakt, který byl uvažován jako chladič na proudovodné dráze. Opalovací kontakt je nejpravděpodobněji ze slitiny wolframu. Pro výpočet bylo uvažováno, že se jedná o čistý wolfram.



Obrázek 6-19 - Rozměry chladiče

Chladicí povrch  $P_v$  byl zjednodušen na konstantní šířku.

$$P_v = \frac{18+21,5+27,5}{3} * 30 - \pi * 2,5^2 - 8 * 1,5 = 638,4 * 10^{-6} m^2 \quad (6-99)$$

Průřez chladiče  $S_v$  byl opět zjednodušen na konstantní šířku.

$$S_v = \frac{18+21,5+27,5}{2} * 2,5 = 55,8 * 10^{-6} m^2 \quad (6-100)$$

Chladicí obvod  $O_v$  chladiče.

$$O_v = \frac{P_v}{l_v} = \frac{638,4 * 10^{-6}}{30 * 10^{-3}} = 21,3 * 10^{-3} m \quad (6-101)$$

Z tabulky 2-44 [2] byla interpolací odečtena měrná chladivost konvekce  $\alpha_0$ .

$$\alpha_k = 5,15 + 0,073 * \theta_p$$

Měrná chladivost zářením  $\alpha_z$  byla opět odečtena z tabulky 2-44 [2] pro hodnoty  $E_z = 0,15$  a  $T_o = 40^\circ C$ .

$$\alpha_z = 1,1 + 0,006 * \theta_p$$

Výsledná měrná chladivost  $\alpha_0$  při oteplení povrchu chladiče  $\theta_p = 50 K$ .

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_z = 5,15 + 0,073 * 50 + 1,1 + 0,006 * 50 = 9,76 Wm^{-2}K^{-1} \quad (6-102)$$

Pomocná veličina  $\beta l$ , která určuje, jestli se jedná o tepelně „krátkou“ nebo „dlouhou“ tyč. Tepelná vodivost  $\lambda_{wolfram}$  byla odečtena z tabulky 2-1 [2].

$$\beta l = l_v * \sqrt{\frac{\alpha_0 * O_v}{\lambda_{wolfram} * S_v}} = 30 * 10^{-3} * \sqrt{\frac{9,76 * 21,28 * 10^{-3}}{150 * 55,8 * 10^{-6}}} = 0,15 [-] \quad (6-130)$$

Jedná se o tepelně dlouhou tyč.

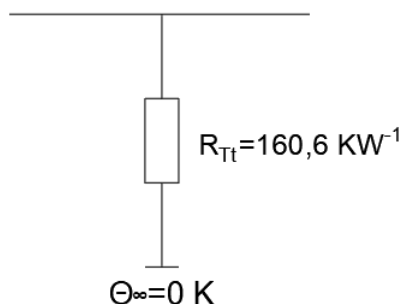
Pomocná veličina  $\delta$ .

$$\delta = \sqrt{\alpha_0 * O_v * \lambda_{wolfram} * S_v} = \sqrt{9,76 * 21,28 * 10^{-3} * 150 * 55,8 * 10^{-6}} = 0,0416 [-] \quad (6-103)$$

Jedná se o jednoduchý odpor  $R_{Tch}$ , který zohledňuje jakékoliv rozměry  $P_v$  a  $S_v$ .

$$R_{Tch} = \frac{1}{\delta * \sinh \beta l} * \left( \cosh \beta l - \frac{\alpha_0 * S_v}{\delta * \sinh \beta l + \alpha_0 * S_v * \cosh \beta l} \right) = \frac{1}{0,0416 * \sinh 0,15} * \left( \sinh 0,15 - \frac{9,76 * 55,8 * 10^{-6}}{0,0416 * \sinh 0,15 + 9,763 * 55,8 * 10^{-6} * \cosh 0,15} \right) = 160,57 KW^{-1} \quad (6-104)$$

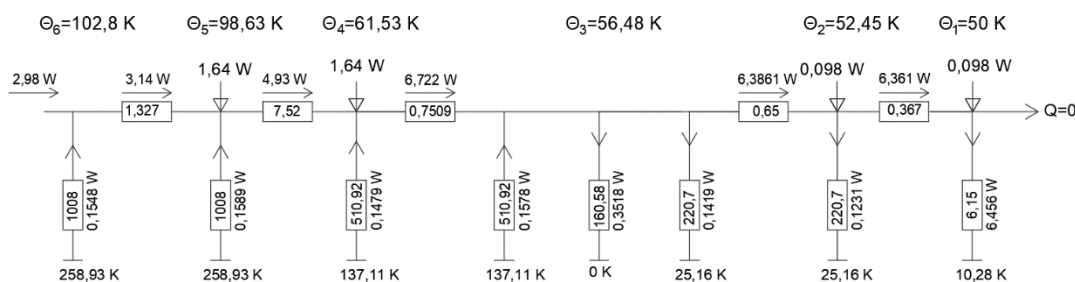
Náhradní schéma chladiče:



Obrázek 6-20 - Náhradní schéma chladiče

## 6.8 Jednořadové náhradní tepelné schéma

Z jednotlivých náhradních schémat úseků bylo složeno celkové schéma jedné poloviny proudovodné dráhy stykače.



Obrázek 6-21 - Jednořadé tepelné schéma  $\theta_{a1} = 50 \text{ K}$

Podle uspořádání proudovodné dráhy je nejvyšší oteplení pravděpodobně ve středu kontaktního můstku, směrem k přívodu klesá. Proto bylo uvažováno oteplení v místě šroubového spoje menší, například  $\theta_{a1} = 50 \text{ K}$ . Potom příčným odporem  $7,26 \text{ KW}^{-1}$  poteče tok  $Q$ .

$$Q_{a1t} = \frac{\theta_{a1} - \theta_{a\infty 1}}{R_{Tl1}} = \frac{50 - 10,28}{6,15} = 6,456 \text{ W} \quad (6-105)$$

Zde by mohl být analogicky použit I. Kirchhoffův zákon: Součet všech proudů přitékajících do uzlu je v každém okamžiku roven nule [5]. Avšak místo proudů byl uvažován tepelný tok  $Q$ . Z Kirchhoffova zákona plyne, že podélným odporem  $0,367 \text{ KW}^{-1}$  teče tepelný tok  $Q_{all}$ .

$$Q_{a1l} = |-6,456 + 0,098| = 6,361 \text{ W} \quad (6-106)$$

Teplotní spád  $\Delta\theta$  na podélném odporu.

$$\Delta\theta_{a2} = 0,367 * 6,361 = 2,45 \text{ K} \quad (6-106)$$

Oteplení na první části přívodního pásku  $\theta_{a2}$ .

$$\theta_{a2} = \theta_{a1} + \Delta\theta_{a2} = 50 + 2,45 = 52,45 \text{ K} \quad (6-107)$$

Při tomto oteplení teče příčným odporem  $220,7 \text{ KW}^{-1}$  tepelný tok.

$$Q_{a2t} = \frac{\theta_{a2} - \theta_{a\infty}}{R_{aTl2}} = \frac{52,45 - 25,16}{220,7} = 0,1231 \text{ W} \quad (6-108)$$

Z uzlové podmínky byl vypočítán tepelný tok podélným odporem  $0,65 \text{ KW}^{-1}$ .

$$Q_{a2l} = |-6,361 - 0,1231 + 0,098| = 6,3861 \text{ W} \quad (6-109)$$

Tepelný spád odporu.

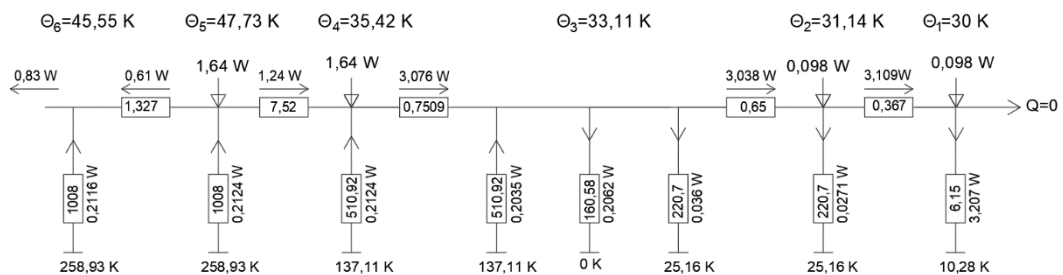
$$\Delta\theta_{a3} = 0,65 * 6,3861 = 4,03 \text{ K} \quad (6-110)$$

Oteplení uzlu  $Q_{a3}$ .

$$Q_{a3} = \theta_{a2} + \Delta\theta_{a3} = 52,45 + 4,03 = 56,58 \text{ K} \quad (6-111)$$

Výše uvedeným způsobem byl dokončen výpočet. Vypočtené hodnoty byly zaznamenány do schématu podle obrázku 6-21.

Jak již bylo několikrát zmíněno, jedná se o symetrickou proudovodnou dráhu podle uzlu 6. Z toho vyplývá, že nemůže docházet k přetokům tepelného toku přes tento uzel. V tomto případě přes uzel přetéká tepelný tok  $Q_{a6} = 2,98 \text{ W}$ . Z přetoku vychází, že odhad oteplení uzlu 1  $\theta_{a1} = 50 \text{ K}$  nebyl správný, proto byl proveden druhý výpočet pro zvolené oteplení  $\theta_{b1} = 30 \text{ K}$ . Vypočtené hodnoty byly zaznamenány v obrázku 6-22.

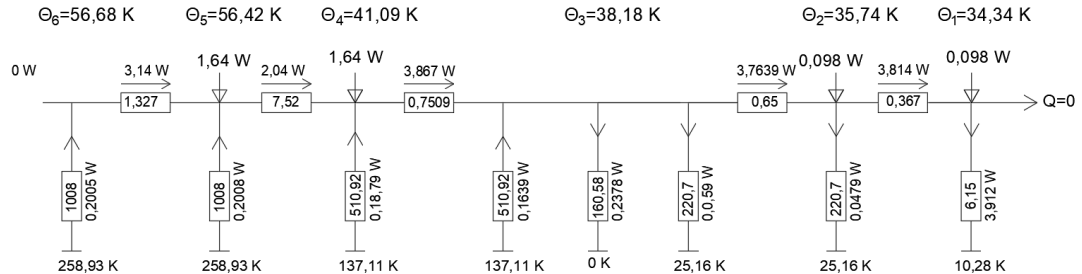


**Obrázek 6-22 - Jednořadá tepelné schéma  $\theta_{b1} = 30 \text{ K}$**

Při tomto výpočtu opět nebyla splněna podmínka nulového výtoku z uzlu 6  $Q_{b6} = -0,83 \text{ W}$ . Tepelný tok z uzlu vytéká (proto je opačné znaménko, než má tepelný tok  $Q_{a6}$ ). Z toho plyne, že správná velikost oteplení uzlu  $\theta_{c1}$  leží mezi zvolenými hodnotami oteplení.

$$\theta_{c1} = \theta_{a1} - \frac{Q_{a6} * (\theta_{b1} - \theta_{a1})}{Q_{b6} - Q_{a6}} = 50 - \frac{2,98 * (30 - 50)}{-0,83 - 2,98} = 34,35 \text{ K} \quad (6-112)$$

S takto zjištěným vstupním oteplením  $\theta_{c1} = 34,35 \text{ K}$  bylo uděláno třetí a poslední řešení schématu. Při posledním výpočtu schématu je  $Q_{c6} = 0 \text{ W}$  (při uvažování dostatečného počtu desetinných míst). Větší přesnost hodnot oteplení než  $\pm 1 \text{ K}$  nemá prakticky žádný význam. [2].



**Obrázek 6-23 - Jednořadé tepelné schéma  $\theta_{c1} = 34,34 \text{ K}$**

Na konci tohoto výpočtu oteplení byly porovnány hodnoty předpokládaného oteplení s hodnotami vypočtenými.

Skutečné oteplení proudovodné dráhy od vypočteného se liší o více jak 5 % u všech uzlů.

$$\Delta T = 0,05 (T_o + \theta) = 0,05(40 + 50) = 4,5 \text{ K} \quad (6-113)$$

To znamená, že muselo být přepočítáno koncové oteplení. Toto neplatí pro přívod proudu. [2]

### 6.8.1 Přepočet svorkového spoje

Odpor pro  $R_{T\bar{s}}$  byl přepočítán pro střední oteplení  $\theta_{12}$  uzlů 1 a 2.

$$\theta_{12} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} = \frac{34,34 + 35,74}{2} = 35,04 \text{ K} \quad (6-114)$$

Odpor svorkového spoje  $R_{T\bar{s}}$ .

$$R'_{T\bar{s}} = \frac{c \cdot R_s}{2} * \left( \frac{1}{\lambda_{Cu} \cdot \varrho_{Cu}} + \frac{1}{\lambda_{Cu} \cdot \varrho_{Cu}} \right) = \frac{0,587 \cdot 5,46 \cdot 10^{-6}}{2} * \left( \frac{1}{385 \cdot 1,92 \cdot (1 + 0,0036 \cdot 35,04) \cdot 10^{-8}} + \frac{1}{385 \cdot 1,92 \cdot (1 + 0,0036 \cdot 35,04) \cdot 10^{-8}} \right) = 0,384 \text{ KW}^{-1} \quad (6-115)$$

### 6.8.2 Přepočet prvního úseku proudovodné dráhy

Přepočet prvního úseku proudovodné dráhy byl přepočítán pro střední oteplení  $\theta_{23}$  mezi uzly 2 a 3.

$$\theta_{23} = \frac{\theta_2 + \theta_3}{2} = \frac{35,74 + 38,18}{2} = 36,96 \text{ K} \quad (6-116)$$

Přepočtený odpor  $R'_{U1}$  úseku č.1

$$R'_{U1} = \frac{\rho_{Cu}}{S_1} * (l_1 - b + k * b) = \frac{1,92 * 10^{-8} * (1 + 0,0036 * 38,96)}{86 * 10^{-6}} * (21,5 - 21,5 + 1,7 * 21,5) * 10^{-3} = 9,25 * 10^{-6} \Omega \quad (6-117)$$

Měrná chladiivost zářením  $\alpha'_z$

$$\alpha'_z = 2,8 + 0,017 * 36,96 = 3,43 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (6-118)$$

Měrná chladiivost konvekcí  $\alpha'_k$

$$\alpha'_k = 5,96 + 0,089 * 36,96 = 9,25 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (6-119)$$

Celkový činitel měrné chladiivosti  $\alpha'_0$

$$\alpha'_0 = \alpha'_k + N\alpha'_z = 9,25 + 0,7 * 3,43 = 11,65 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (6-120)$$

Oteplení  $\theta'_\infty$  konců příčných větví  $\pi$ -článku.

$$\theta'_\infty = \frac{R'_{U1} * I^2}{\alpha'_0 * P_v} = \frac{9,25 * 10^{-6} * 190^2}{11,65 * 770 * 10^{-6}} = 41 \text{ K} \quad (6-121)$$

### 6.8.3 Přepočet chladiče

Přepočet chladiče byl spočítán pro oteplení  $\theta_3 = 38,18 \text{ K}$  v uzlu 3.

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_z = 5,15 + 0,073 * 50 + 1,1 + 0,006 * 38,18 = 8,85 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1} \quad (6-122)$$

$$\beta l = l_v * \sqrt{\frac{\alpha_0 * O_v}{\lambda_{wolfram} * S_v}} = 30 * 10^{-3} * \sqrt{\frac{8,85 * 21,28 * 10^{-3}}{150 * 55,8 * 10^{-6}}} = 0,14 [-] \quad (6-123)$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_0 * O_v * \lambda_{wolfram} * S_v} = \sqrt{8,85 * 21,28 * 10^{-3} * 150 * 55,8 * 10^{-6}} = 0,0396 [-] \quad (6-124)$$

$$R_{Tch} = \frac{1}{\delta * \sinh \beta l} * \left( \cosh \beta l - \frac{\alpha_0 * S_v}{\delta * \sinh \beta l + \alpha_0 * S_v * \cosh \beta l} \right) = \frac{1}{0,0396 * \sinh 0,14} * \left( \sinh 0,14 - \frac{8,85 * 55,8 * 10^{-6}}{0,0396 * \sinh 0,14 + 8,85 * 55,8 * 10^{-6} * \cosh 0,14} \right) = 177 \text{ KW}^{-1} \quad (6-125)$$

### 6.8.4 Přepočet druhého úseku proudovodné dráhy

Přepočet druhého úseku proudovodné dráhy byl přepočítán pro střední oteplení

$\theta_{34}$  mezi uzly 3 a 4.

$$\theta_{34} = \frac{\theta_3 + \theta_4}{2} = \frac{38,18 + 41,09}{2} = 36,64 \text{ K} \quad (6-126)$$



$$\theta_p = -\frac{1+AK}{2BK} + \sqrt{\left(\frac{1+AK}{2BK}\right)^2 + \frac{\theta_V}{BK}} = -\frac{1+8,727*0,1293}{2*0,066*0,1293} + \sqrt{\left(\frac{1+8,727*0,1293}{2*0,066*0,1293}\right)^2 + \frac{36,64}{0,066*0,1293}} = 16,17 \text{ K} \quad (6-127)$$

Výsledná měrná chladivost  $\alpha_0$ .

$$\alpha_0 = A + B * \theta_p = 8,727 + 0,066 * 16,17 = 9,79 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (6-128)$$

Náhradní chladivost  $\alpha_{0n}$ .

$$\alpha_{0n} = \frac{1}{P_v * \left( \sum R_T + \frac{1}{\alpha_0 * P_p} \right)} = \frac{1}{706*10^{-6} * \left( 26 + 123 + \frac{1}{9,79*0,93*10^{-3}} \right)} = 5,47 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (6-129)$$

Oteplení koncových bodů příčných větví  $\theta_\infty$ .

$$\theta_\infty = \frac{R * I^2}{\alpha_{0n} * P_v} = \frac{14,3*10^{-6} * 190^2}{5,47*706*10^{-6}} = 133,26 \doteq 133 \text{ K} \quad (6-130)$$

## 6.8.5 Přepočet hlavního kontaktu

Přepočet hlavního kontaktu probíhal obdobně jako u svorkového spoje.

Odpor pro  $R_{Ts}$  byl počítán pro střední oteplení  $\theta_{45}$  uzlů 4 a 5.

$$\theta_{45} = \frac{\theta_4 + \theta_5}{2} = \frac{41,09 + 56,42}{2} = 48,76 \text{ K} \quad (6-131)$$

Odpor svorkového spoje  $R'_{Ts}$ .

$$R'_{Ts} = \frac{c * R_s}{\lambda_{Ag} * \varrho_{Ag} * (1 + \alpha * \theta_{45})} = \frac{0,77*88,5*10^{-6}}{418*1,82*10^{-8} * (1 + 0,0038*48,76)} = 7,55 \text{ KW}^{-1} \quad (6-132)$$

## 6.8.6 Přepočet kontaktního můstku

Přepočet kontaktního můstku byl počítán pro střední oteplení  $\theta_{56}$  uzlů 5 a 6.

$$\theta_{56} = \frac{\theta_5 + \theta_6}{2} = \frac{56,42 + 56,68}{2} = 56,45 \text{ K} \quad (6-133)$$

Odpor poloviny kontaktního můstku  $R'_{KM2}$ .

$$R'_{KM2} = \frac{1}{2} * \frac{\rho_{Cu}}{S_{KU}} * (l_K - b + k * b) = \frac{1}{2} * \frac{1,92*10^{-8} * (1 + 0,0036*56,45)}{45*10^{-6}} * (46 - 15 + 1,7 * 15) * 10^{-3} = 14,5 * 10^{-6} \Omega \quad (6-134)$$

Oteplení vodiče  $\theta'_v = 65,71 \text{ K}$ , který je potřeba zvolit pro výpočet oteplení  $\theta_p$ .

$$\theta_p' = -\frac{1+AK}{2BK} + \sqrt{\left(\frac{1+AK}{2BK}\right)^2 + \frac{\theta_V}{BK}} = -\frac{1+6,53*0,569}{2*0,0634*0,569} + \sqrt{\left(\frac{1+6,53*0,569}{2*0,0634*0,569}\right)^2 + \frac{56,45}{0,0634*0,569}} = 11,03 \text{ K} \quad (6-135)$$

Celková měrná chladivost  $\alpha'_0$ .

$$\alpha'_0 = A + B * \theta_p' = 6,53 + 0,0634 * 11,03 = 7,23 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \quad (6-136)$$

Náhradní měrná chladivost  $\alpha'_{0n}$ .

$$\alpha'_{0n} = \frac{1}{P_v * \left( \sum R_T + \frac{1}{\alpha'_0 * S_b} \right)} = \frac{1}{528*10^{-6} * \left( 2,84 + 402,14 + \frac{1}{7,23*0,9*10^{-3}} \right)} = 3,76 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (6-137)$$

Oteplení  $\theta'_\infty$  konců příčných větví  $\pi$ -článku.

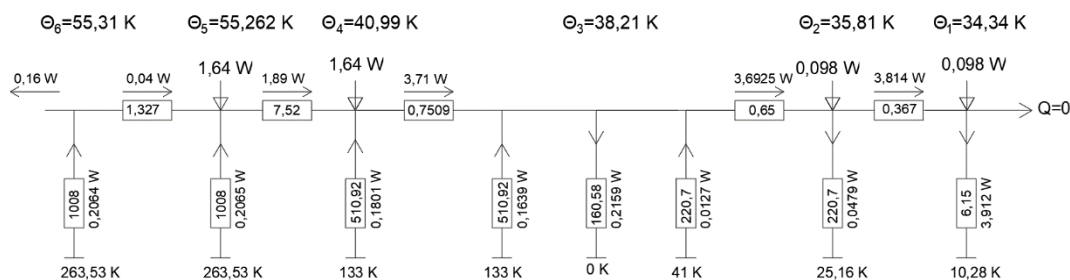
$$\theta_\infty = \frac{R'_{KM2} * I^2}{\alpha_{0n} * P_v} = \frac{14,5*10^{-6} * 190^2}{3,76*590,33*10^{-6}} = 263,53 \text{ K} \quad (6-138)$$

## 6.8.7 Porovnání přepočtených hodnot

Porovnáním přepočtených hodnot bylo zjištěno, že se podélný odpor šroubového spoje a kontaktního styku změnily. Dále se změnila i koncová oteplení jednotlivých částí.

Po dosazení těchto přepočtených hodnot je vidět na obrázku 6-24, že je přetok tepelného toku do druhé poloviny stykače. Po přepočtu jednořadého tepelného schématu, viz kapitola 5.8, bylo zjištěno, že oteplení jednotlivých uzlů se zvýšilo o 0,5 až 2 K.

Stykač nevyhověl dovolenému oteplení podle normy ČSN EN 60947-4-1 v uzlech 5 a 6. Jedním z faktorů může být to, že se při výpočtech neuvažovalo se skutečným čelem stykače. Toto čelo (obrázek 8-1) obsahuje v sobě plíšky, které slouží k zhasínání elektrického oblouku a k chlazení, tím pádem i k lepšímu odvodu vznikajícího tepla.



Obrázek 6-24 – Jednořadé tepelné schéma - přepočtené

## 6.9 Krátkodobé oteplení

Krátkodobé oteplení se zjišťuje pro nejužší průřez na proudovodné dráze. Zde se jedná o kontaktní můstek s rozměrem 15 x 3 mm, kde se nachází otvor o průměru 7 mm. Zúžený průřez  $S_k$ .

$$S_k = (15 - 8) * 10^{-3} * 3 * 10^{-3} = 24 * 10^{-6} m \quad (6-139)$$

Střední oteplení  $\theta_n$  kontaktního můstku v ustáleném stavu. Jelikož se hodnoty liší jen o desetiny, tak střední oteplení bylo zaokrouhleno na  $\theta_n = 55$  K.

Teplota kontaktního můstku  $T_n$  při vzniku zkratu a při maximální teplotě okolí.

$$T_n = T_{om} + \theta_n = 40 + 55 = 95^\circ C \quad (6-140)$$

Maximální dovolené krajní oteplení měděného vodiče  $\theta_k$ , dotýkající se s izolantem třídy A tab. 2-65 [2].

$$\theta_k = T_k - T_{om} - \theta_n = 250 - 40 - 55 = 155 K \quad (6-141)$$

Odpor mědi  $\rho_{Cu102}$  při teplotě  $95^\circ C$ .

$$\rho_{Cu95} = \rho_{Cu40} * (1 + \alpha * \theta_n) = 1,92 * 10^{-8} (1 + 0,0036 * 55) = 2,3 * 10^{-8} \Omega m \quad (6-142)$$

Teplotní činitel odporu  $\alpha_{Cu102}$  při teplotě  $95^\circ C$ .

$$\alpha_{Cu95} = \alpha * \frac{\rho_{Cu40}}{\rho_{Cu95}} = 0,0036 * \frac{1,92 * 10^{-8}}{2,3 * 10^{-8}} = 0,00301 [-] \quad (6-143)$$

Pomocná veličina  $k$  pro jednovteřinový proud  $t_k = 1$  s.

$$k = \frac{\theta_k}{t_k + \alpha_{Cu95} * t_k * \theta_k} = \frac{155}{1 + 0,00301 * 1 * 155} = 105,69 \div 106 [-] \quad (6-144)$$

Krajní jednovteřinový proud  $I_{k1}$ .

$$I_{k1} = S_k * \sqrt{\frac{k * c}{\rho_{Cu95}}} = 24 * 10^{-6} * \sqrt{\frac{106 * 3,4 * 10^6}{2,248 * 10^{-8}}} = 3038 A \quad (6-145)$$

V tabulce 6-1 jsou uvedeny hodnoty krajně přípustných proudů pro několik různých dob trvání zkratu. Příklad výpočtu pro čas  $t_2 = 0,5$  s.

$$I_k = I_{k1} * \sqrt{\frac{t_1}{t_2}} = 3038 * \sqrt{\frac{1}{0,5}} = 4296 A \quad (6-146)$$

**Tabulka 6-1 - Krajiní přípustné zkratové proudy**

|                    |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|
| t [s]              | 0,5  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| I <sub>k</sub> [A] | 4296 | 2980 | 2148 | 1754 | 1519 | 1358 |

V kapitole 3.7 Bilance elektrodynamických sil byla stanovena hodnota kontaktní síly  $F_k = 23$  N. Na jednu proudovodnou úžinu však působí jen polovina síly  $F_k$ , z toho plyne, že  $F_{k1/2} = 11,5$  N. Elektrodynamická odlehčovací síla  $F_{dn}$  při zkratovém proudu  $I_k = 1520$  A. Z toho byl stanoven proud svaření  $I_{sv}$  stříbrných kontaktů.

$$F_{dn} = 0,5 * F_E = 0,5 * 11,5 = 5,75 \text{ N} \quad (6-147)$$

Po splnění určitých podmínek [2] by bylo možné počítat přesnějším způsobem, pokud by tyto podmínky nebyly splněny, počítalo by se podle vzorce (6-148).

$$I_{sv} \approx \frac{U_{sv}}{1,5 * R_s} \text{ [A]} \quad (6-148)$$

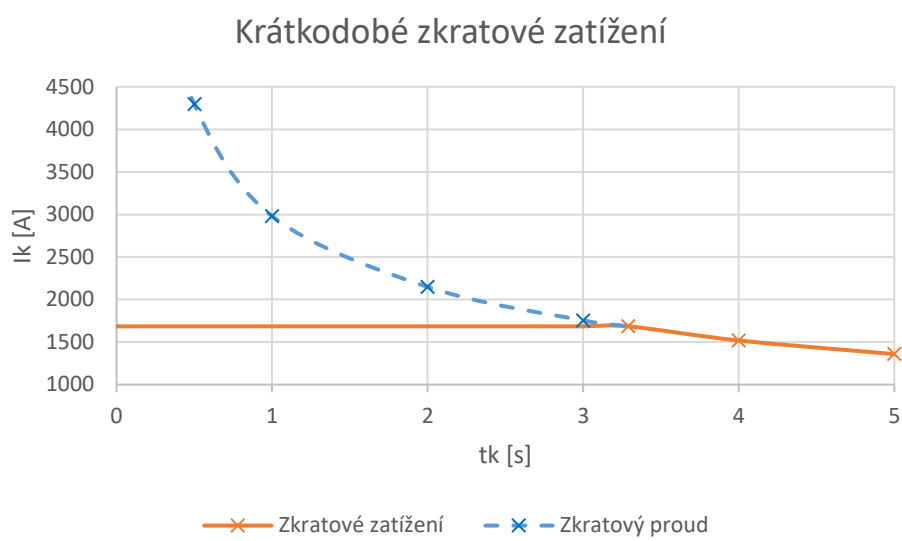
V tomto případě byly podmínky splněny a bylo možné pokračovat v přesnějším výpočtu. Aby mohl být vypočítán proud svaření  $I_{sv}$ , musely být vypočítány pomocné veličiny  $A$  a  $B$ .

$$A = \left( \frac{U_{sv}}{1,5 * k} \right)^2 = \left( \frac{0,37}{1,5 * 3 * 10^{-4}} \right)^2 = 6,7 * 10^5 \text{ [-]} \quad (6-149)$$

$$B = \frac{F_{dn}}{I_k^2} = \frac{5,75}{1520^2} = 2,38 * 10^{-6} \text{ [-]} \quad (6-150)$$

$$I_{sv} = \sqrt{\frac{A * F_{k1/2}}{1 + A * B}} = \sqrt{\frac{6,7 * 10^5 * 11}{1 + 6,7 * 10^5 * 2,38 * 10^{-6}}} = 1685 \text{ A} \quad (6-151)$$

V grafu 6-1 jsou vypočtené údaje charakteristiky krátkodobého zkratového zatížení. Z grafu je patrné, že efektivní velikost krátkodobého proudu nesmí překročit 1685 A (s ohledem na svaření kontaktů). Kontakty stykače musí vydržet osminásobek jmenovitého proudu, který stykač kategorie AC 3 musí být schopen zapínat [4].



**Graf 6-1 - Krátkodobé zkratové zatížení**

## 7 MĚŘENÍ OTEPLENÍ STYKAČE

Oteplovací zkouška nízkonapětového stykače se měří podobně jako u ostatních elektrických přístrojů.

Oteplení nebo teplota se dají měřit různými způsoby. Sondou nebo teploměrem se obvykle měří teplota kapalin. Teploměr, případně sonda, musí být umístěny v dostatečné hloubce pod hladinou, aby byla naměřena co nejvyšší teplota. Termočlánky se nejčastěji používají jako sondy, které umožní použití různých přístrojů provádějících záznam pro vykreslení oteplovací křivky.

Měřicí přístroje s polovodičovým čidlem (termistorem) lze použít místo termočlánků. Termistory mají řadu výhod. Malá tepelná kapacita čidla dovoluje měření v kapalinách, plynech, na malých předmětech i na izolantu. Časová konstanta je velmi malá, takže lze měřit tímto čidlem i oteplení při zkratových zkouškách. [6]

Oteplovací zkouška trvá tak dlouho, dokud změna oteplení za jednu hodinu je menší než 1 K. [4]

Při zkrácené oteplovací zkoušce se na začátku zvýší zatěžovací parametry, ale zároveň musí dojít k ustálení teploty při předepsaných podmínkách. [6]

Jednotlivé části proudovodné dráhy nesmí přesáhnout maximální dovolené oteplení viz tabulka 7-1.

**Tabulka 7-1 - Maximální dovolené oteplení částí přístroje při okolní teplotě [2]**

| Součást, materiál, izolace spínacího přístroje nn   |                        | Max. dovolené oteplení K při teplotě okolí |       |
|---|------------------------|--|-------|
|   |                        | 35 °C                                      | 40 °C |
| Kontakty hlavní i pomocné ve vzduchu  | Měděné                 | 50   | 45    |
|   | Z jiných kovů a slitin | *  | *     |
| Kontakty v oleji  |                        | 45   | 40    |
| Hole a izolované vodiče, vinutí cívek   |                        | *  | *     |
| Kovové části ve styku s izolanty  |                        | *  | *     |
| Připojovací svorky  |                        | 55   | 50    |
| Kov ve styku s olejem   |                        | 65   | 60    |
| Olej  |                        | 45   | 40    |
| Sílové vodiče s termoplastickou izolací   |                        | 25   | 20    |
| * Značí takové oteplení, aby se nepoškodily přiléhající části. Jsou-li jimi izolanty, platí oteplení dle tabulky 2-51 [2] |                        |  |       |

## 7.1 Měření oteplení stykače V 140 F

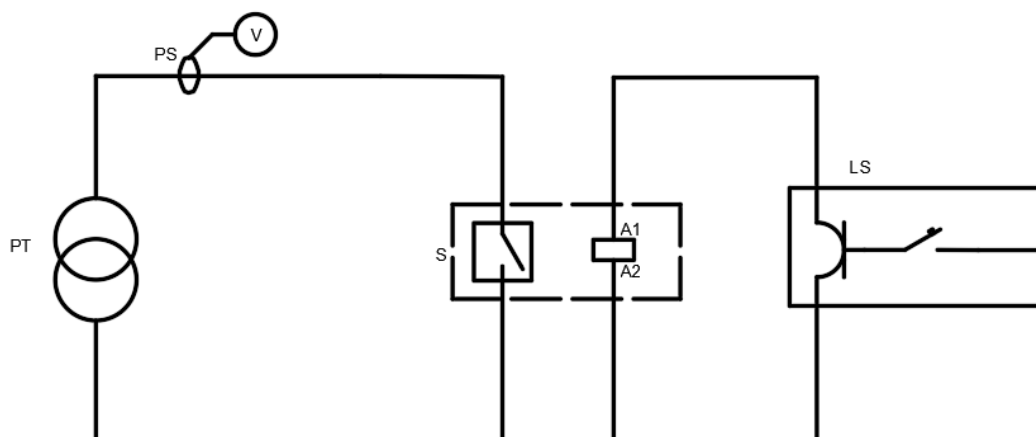
V následující kapitole je popsáno vlastní měření stykače V 140 F. Měření bylo uskutečněno v laboratořích Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií pod vedení pana Ing. Davida Šimka. Jako měřicí senzory byly použity termočlánky, které byly připojeny k univerzální měřicí ústředně ALMEMO 5690-2. Při měření byla zapojena jen prostřední proudovodná dráha.

U měřeného stykače chyběla jedna stěna, ve které byly umístěny plíšky, které sloužily k odvodu tepla. Při přípravě měření byla odejmuta i druhá část stěny a obě byly nahrazeny stříbrnou lepicí páskou. Tloušťka této pásky byla 1 mm.

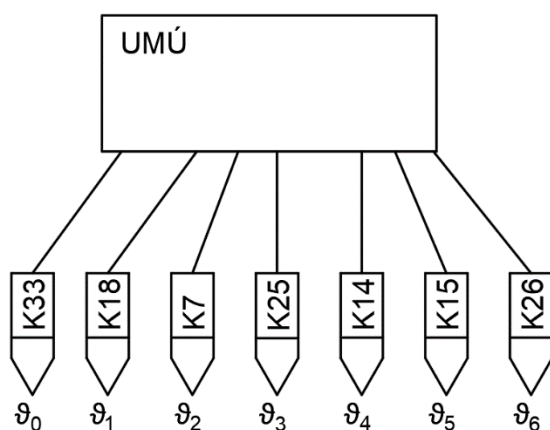
**Tabulka 7-2 - Seznam použitých měřících přístrojů a pomůcek**

| Označení                    | Přístroj                    | Typ           | Výrobní/evidenční číslo                     |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------|---|
| UMÚ                         | Univerzální měřicí ústředna | ALMEMO 5690-2 | A12110213                                   |
| PS                          | Proudová sonda              | A 050         | 213338                                      |
| V                           | Multimetr                   | Hexagon 340 A | 122180474                                   |
| TP                          | Transformátor proudu        | CTR-2         | 317340                                      |
| $\vartheta_0 - \vartheta_6$ | Termočlánky                 | NiCr          | K7, K14, K15, K18, K25, K26, K33            |
| S                           | Stykač                      | V 140 F       |   |
| LS                          | Laboratorní stůl            |               |   |
|                             | Termokamera                 | FLIR E95      | 78505197                                    |
|                             | Kabel                       |               | $l = 3 \text{ m}$<br>$S = 120 \text{ mm}^2$ |

### 7.1.1 Schéma zapojení



Obrázek 7-1 - Schéma zapojení silové a řídicí části



Obrázek 7-2 - Schéma zapojení termočlánků

### 7.1.2 Postup měření

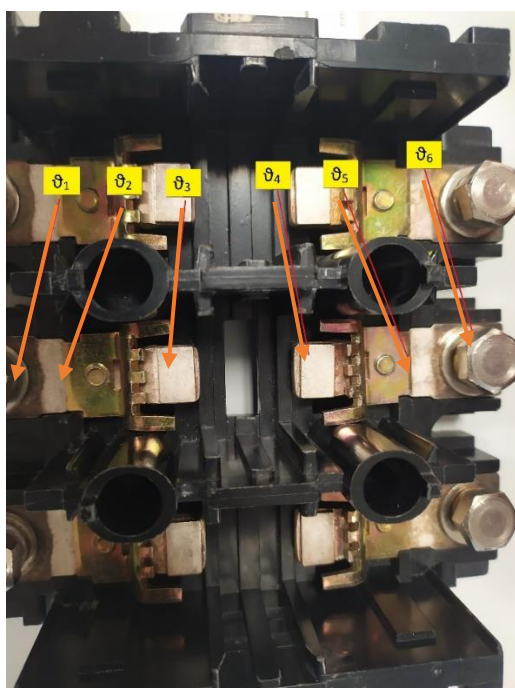
1. Stykač byl do obvodu zapojen podle obrázku 7-1. Transformátor proudu byl připojen ke stykači kabely o délce 2 m a průřezu 120 mm<sup>2</sup>.
2. Měřící zařízení bylo připojeno podle obrázku 7-2. Termočlánky byly umístěny na prostřední proudovodnou dráhu podle obrázku 7-3.
3. Byl zapnut laboratorní stůl a na proudovém transformátoru byl nastaven proud tak, aby hodnoty na voltmetru odpovídaly 190 A.
4. Byla zapnuta univerzální měřicí ústředna.
5. Proběhlo měření teploty v čase. Hodnoty byly zaznamenány do tabulky 7-4.
6. Naměřené hodnot byly vyneseny v grafické závislosti.
7. Vyhodnocení měření.



### 7.1.3 Tabulky naměřených a vypočtených hodnot

Tabulka 7-3 - Rozmístění termočlánků

|               |                  |
|---------------|------------------|
| $\vartheta_0$ | Teplota okolí    |
| $\vartheta_1$ | Šroubový spoj    |
| $\vartheta_2$ | Pod chladičem    |
| $\vartheta_3$ | Kontaktní můstek |
| $\vartheta_4$ | Kontaktní můstek |
| $\vartheta_5$ | Pod chladičem    |
| $\vartheta_6$ | Šroubový spoj    |



Obrázek 7-3 - Umístění termočlánků

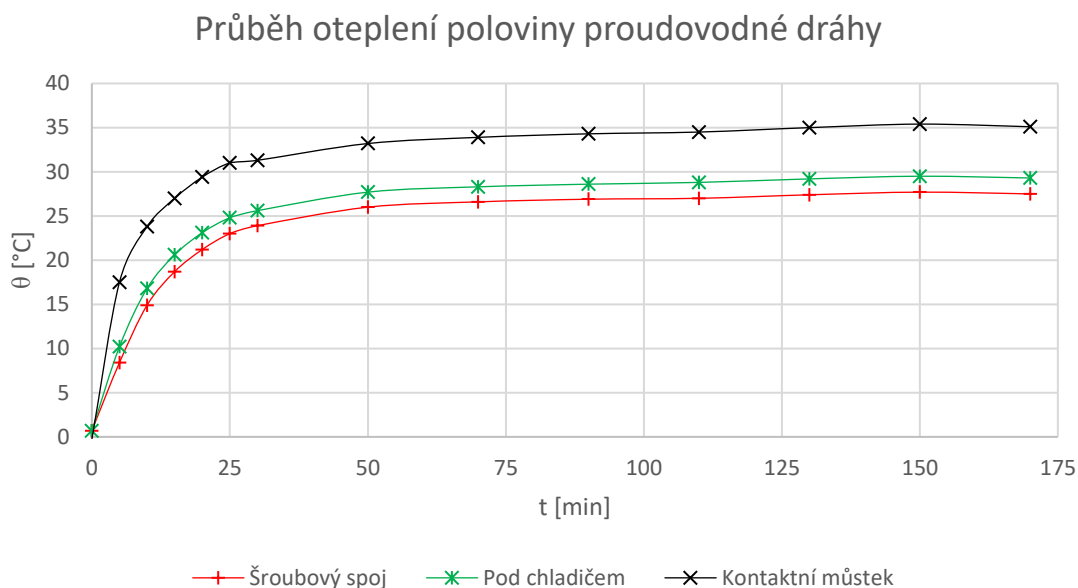
**Tabulka 7-4 - Naměřené hodnoty teplot stykače**

| I [A] | t <sub>0</sub> [-] | t [min] | θ <sub>0</sub> [°C] | θ <sub>1</sub> [°C] | θ <sub>2</sub> [°C] | θ <sub>3</sub> [°C] | θ <sub>5</sub> [°C] | θ <sub>6</sub> [°C] |
|-------|--------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 190   | 9:36:49            | 0       | 22,3                | 23,00               | 23                  | 22,00               | 22,00               | 22,00               |
| 190   | 9:41:49            | 5       | 22,5                | 30,90               | 32,7                | 40,00               | 30,20               | 31,70               |
| 190   | 9:46:49            | 10      | 22,7                | 37,60               | 39,5                | 46,50               | 36,30               | 39,10               |
| 190   | 9:51:49            | 15      | 22,9                | 41,60               | 43,5                | 49,90               | 40,10               | 43,50               |
| 190   | 9:56:49            | 20      | 23                  | 44,20               | 46,1                | 52,40               | 42,60               | 46,50               |
| 190   | 10:01:49           | 25      | 23,1                | 46,10               | 47,9                | 54,10               | 44,30               | 48,40               |
| 190   | 10:06:49           | 30      | 23,2                | 47,10               | 48,8                | 54,50               | 45,20               | 49,50               |
| 190   | 10:26:49           | 50      | 23,6                | 49,60               | 51,3                | 56,80               | 47,30               | 52,00               |
| 190   | 10:46:49           | 70      | 23,9                | 50,50               | 52,2                | 57,80               | 48,10               | 52,80               |
| 190   | 11:06:49           | 90      | 24,1                | 51,00               | 52,7                | 58,40               | 48,60               | 53,30               |
| 190   | 11:26:49           | 110     | 24,2                | 51,20               | 53                  | 58,70               | 48,70               | 53,50               |
| 190   | 11:46:49           | 130     | 24,1                | 51,50               | 53,3                | 59,10               | 49,00               | 53,70               |
| 190   | 12:06:49           | 150     | 24                  | 51,70               | 53,5                | 59,40               | 49,10               | 53,80               |
| 190   | 12:26:49           | 170     | 24,1                | 51,60               | 53,4                | 59,20               | 49,10               | 53,80               |

**Tabulka 7-5 - Vypočtené hodnoty oteplení stykače**

| I [A] | t <sub>0</sub> [-] | t [min] | θ <sub>1</sub> [°C] | θ <sub>2</sub> [°C] | θ <sub>3</sub> [°C] | θ <sub>5</sub> [°C] | θ <sub>6</sub> [°C] |
|-------|--------------------|---------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 190   | 9:36:49            | 0       | 0,7                 | 0,7                 | -0,3                | -0,3                | -0,3                |
| 190   | 9:41:49            | 5       | 8,4                 | 10,2                | 17,5                | 7,7                 | 9,2                 |
| 190   | 9:46:49            | 10      | 14,9                | 16,8                | 23,8                | 13,6                | 16,4                |
| 190   | 9:51:49            | 15      | 18,7                | 20,6                | 27,0                | 17,2                | 20,6                |
| 190   | 9:56:49            | 20      | 21,2                | 23,1                | 29,4                | 19,6                | 23,5                |
| 190   | 10:01:49           | 25      | 23,0                | 24,8                | 31,0                | 21,2                | 25,3                |
| 190   | 10:06:49           | 30      | 23,9                | 25,6                | 31,3                | 22,0                | 26,3                |
| 190   | 10:26:49           | 50      | 26,0                | 27,7                | 33,2                | 23,7                | 28,4                |
| 190   | 10:46:49           | 70      | 26,6                | 28,3                | 33,9                | 24,2                | 28,9                |
| 190   | 11:06:49           | 90      | 26,9                | 28,6                | 34,3                | 24,5                | 29,2                |
| 190   | 11:26:49           | 110     | 27,0                | 28,8                | 34,5                | 24,5                | 29,3                |
| 190   | 11:46:49           | 130     | 27,4                | 29,2                | 35,0                | 24,9                | 29,6                |
| 190   | 12:06:49           | 150     | 27,7                | 29,5                | 35,4                | 25,1                | 29,8                |
| 190   | 12:26:49           | 170     | 27,5                | 29,3                | 35,1                | 25,0                | 29,7                |

## 7.1.4 Průběh oteplení



**Graf 7-1 - Průběh oteplení poloviny proudovodné dráhy stykače V 140 F**

## 7.1.5 Závěr měření

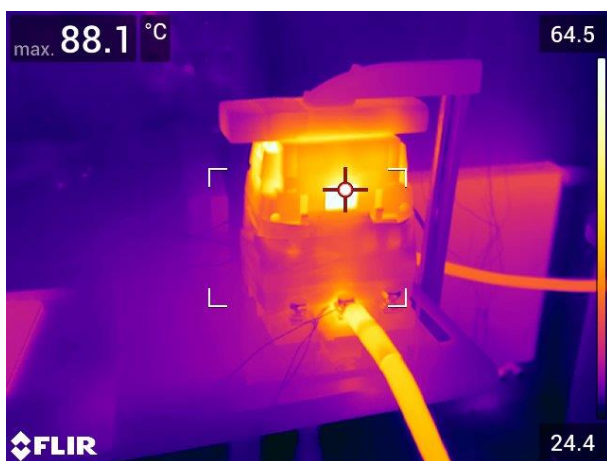
V průběhu měření se odlepil termočlánek  $\vartheta_4$  umístěný na kontaktním můstku, proto hodnoty nebyly zaneseny do tabulky. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7-4. Vypočtené hodnoty oteplení proudovodné dráhy jsou zaneseny v tabulce 7-5. Do grafu 7-1 byl vynesena průběh oteplení stykače jen poloviny proudovodné dráhy, která je symetrická. Stykač V 140 F vyhověl normě ČSN EN 60947-4-1. Maximální oteplení 34,9 K bylo naměřeno v kontaktním můstku. Norma udává maximální možné oteplení kontaktního můstku 45 K při teplotě okolí 40 °C.

Podmínky okolí: tlak: 956,6 hPa  
vlhkost: 22,3%  
teplota: viz tabulka 7-4

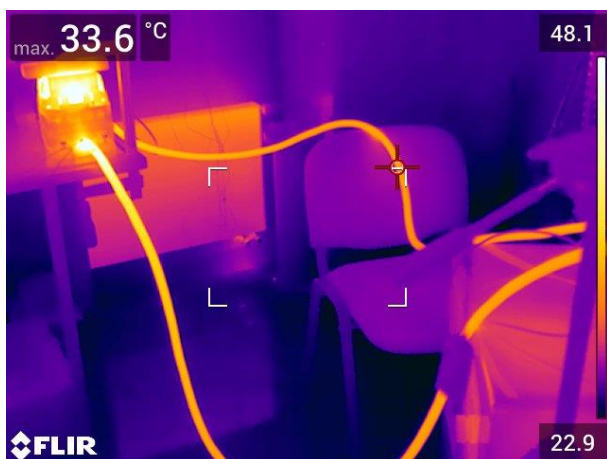
## 7.1.6 Obrazová dokumentace



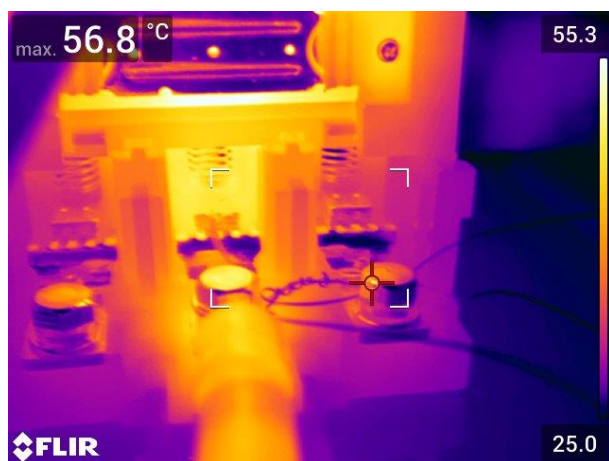
Obrázek 7-4 - Měřicí pracoviště



Obrázek 7-5 - Záběr z termokamery na měřicí pracoviště



Obrázek 7-6 - Záběr z termokamery na přívodní vodiče



**Obrázek 7-7 - Záběr z termokamery na proudovodnou dráhu po vypnutí**

## 8 POROVNÁNÍ VYPOČTENÝCH A NAMĚŘENÝCH HODNOT

**Tabulka 8-1 - Porovnání naměřených a vypočtených hodnot**

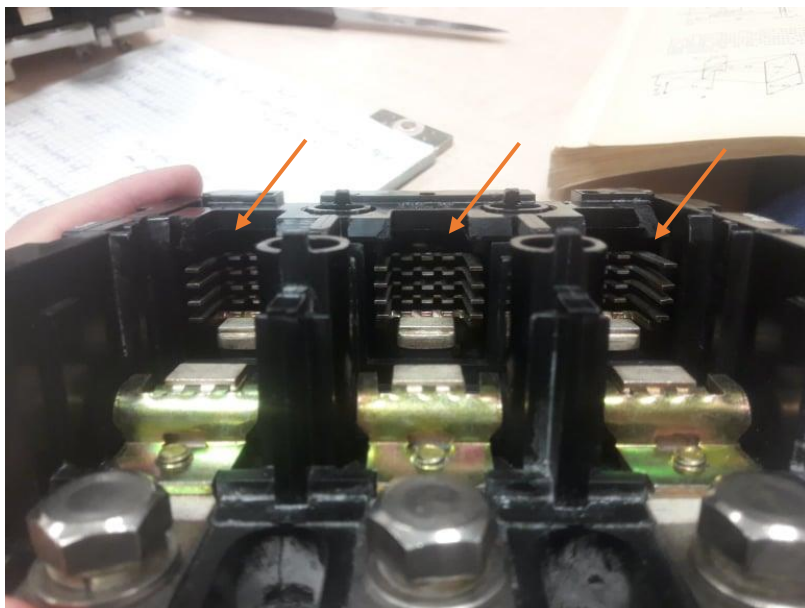
| Označení bodu    | Vypočítaná hodnota oteplení $\theta$ [K] | Naměřená hodnota oteplení $\theta$ [K] |
|------------------|--|--|
| Přívodní kabel   | 10,28                                    | 9,6*                                   |
| Šroubový spoj    | 34,34                                    | 27,5                                   |
| Chladič          | 38,21                                    | 29,3                                   |
| Kontaktní můstek | 55,31                                    | 35,1                                   |

\* Na přívodní kabel nebyl umístěn termočlánek, hodnota byla odečtena z termokamery (obrázek 7-6).

Při výpočtech bylo uděláno velké množství zjednodušení. Kde bylo možné, byly hodnoty voleny spíše vyšší. To by mělo vést k rezervě při oteplení reálného přístroje.

Jak je vidět z tabulky 8-1, tak všechna vypočtená oteplení vyšla vyšší než naměřená. U přívodního kabelu je skoro minimální rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou. Tento minimální rozdíl je způsoben tím, že kabel se chladí přímo do okolí.

Nejvyšší rozdíl oteplení je na kontaktním můstku. Tento rozdíl je způsoben tím, že výpočet uvažuje chlazení jen do čela stykače (lepící páska). Při měření předpokládáme, že vznikající teplo se odvádí do postranních drah. V těchto drahách posloužily proudovodné dráhy jako chladiče a teplo mohlo taktéž přestupovat přes boční a čelní stěny do okolí. Pokud by bylo originální čelo (obrázek 8-1), které má na sobě plíšky, které slouží k zhasínání případného vzniku elektrického oblouku a odvodu tepla, byla by naměřená hodnota ještě o něco nižší.



**Obrázek 8-1 - Originální čelo stykače**

## 9 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá kontrolou parametrů stykače V 140 F, výpočtem a měřením.

První a druhá kapitola shrnují základní parametry kladené na stykače, izolační vzdálenosti a proudy, které jsou vyvinuty na stykače v různých provozech a prostředích.

Třetí kapitola popisuje výpočet působení elektrodynamických sil na pohyblivý kontakt stykače.

Čtvrtá a pátá kapitola se věnují návrhu vypínacího mechanismu. Konkrétněji čtvrtá kapitola se zaměřuje na návrh vypínacích a přitlačných pružin a pátá kapitola na návrh elektromagnetu.

V šesté kapitole se počítá oteplení proudovodné dráhy. Výpočet proudovodné dráhy se skládá z několika částí: výpočet odporů jednotlivých částí proudovodné dráhy, vypočtení náhradních schémat částí proudovodné dráhy, výpočet jednořadého tepelného schématu, přepočet jednořadého tepelného schématu a zhodnocení výpočtu, které musí splňovat normu ČSN EN 60947-4-1. Výpočtem ověřovaný stykač nevyhověl normě ČSN EN 60947-4-1. V poslední části šesté kapitoly se počítá krátkodobé oteplení v nejužším místě proudovodné dráhy.

Sedmá kapitola se zabývá měřením oteplení ověřovaného stykače V 140 F v laboratořích FEKTu. Při měření stykač vyhověl normě ČSN EN 60947-4-1 s dostatečnou rezervou.

V poslední osmé kapitole jsou porovnány hodnoty měření a výpočtu. S rozdílností hodnot bylo počítáno, při výpočtu se zavádí různá zjednodušení. Výpočtem se nedá dosáhnout hodnot naměřených. Vypočtené hodnoty jsou pouze orientační, směrodatné hodnoty dává pak samotné měření.



# Literatura

- [1] SLADE, Paul G. *Electrical contacts: principles and applications*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2014, xliv, 1268 stran: ilustrace. ISBN 978-1-4398-8130-9.
- [2] HAVELKA, Otto, Dalibor SVOBODA a Zdeněk VÁVRA. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. Brno: VUT, 1985, 188 s.
- [3] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985, 436 s.
- [4] ČSN EN 60947-4-1: *Stykače a spouštěče motorů - Elektromechanické stykače a spouštěče motorů*. Část 4-1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010
- [5] TRNKA, Zdeněk a Z TRNKA. *Teoretická elektrotechnika*. 4. uprav.dopl.vyd. Praha: Bratislava: SNTL; ALFA, 1972, 410 s.: il.
- [6] KOPEČEK, Jan a Miloš DVOŘÁK. *Přístrojové transformátory (měřicí a jistící)*. Praha: Academia, 1966. Dostupné také z: <https://1url.cz/2z2Ne>
- [7] ČMIEL, Jiří. *Návrh stykače nízkého napětí*. Ostrava, 2017, 87 s. Dostupné také z: <https://1url.cz/Mz2N1>. Diplomová práce. VŠB –Technická univerzita Ostrava Fakulta elektrotechniky a informatiky Katedra elektroenergetiky. Vedoucí práce Zdeňek Hytka.

# Seznam symbolů a zkratek

## Zkratky:

|      |     |   |
|------|-----|---|
| FEKT | ... | Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií |
| VUT  | ... | Vysoké učení technické v Brně                       |

## Symbols:

|           |     |                          |                      |
|-----------|-----|--------------------------|----------------------|
| U         | ... | napětí                   | [V]                  |
| I         | ... | proud                    | [A]                  |
| R         | ... | odpor                    | [ $\Omega$ ]         |
| Z         | ... | impedance                | [ $\Omega$ ]         |
| X         | ... | reaktance                | [ $\Omega$ ]         |
| l         | ... | délka                    | [m]                  |
| L         | ... | indukčnost               | [H]                  |
| S         | ... | průřez                   | [m <sup>2</sup> ]    |
| P         | ... | povrch                   | [m <sup>2</sup> ]    |
| r         | ... | poloměr                  | [m]                  |
| d         | ... | průměr                   | [m]                  |
| f         | ... | frekvence                | [Hz]                 |
| B         | ... | indukce                  | [T]                  |
| F         | ... | síla                     | [N]                  |
| m         | ... | hmotnost                 | [kg]                 |
| $\rho$    | ... | měrný el. odpor          | [ $\Omega\text{m}$ ] |
| $\alpha$  | ... | teplotní činitel odporu  | [K <sup>-1</sup> ]   |
| H         | ... | tvrdost                  | [Pa]                 |
| $\tau_D$  | ... | namáhání ve smyku        | [Pa]                 |
| $K_F$     | ... | činitel rozptylu         | [kg]                 |
| L         | ... | délka pružiny            | [m]                  |
| $K_F$     | ... | činitel plnění           | [-]                  |
| $\varphi$ | ... | Wahlův součinitel        | [-]                  |
| G         | ... | modul pružnosti ve smyku | [Pa]                 |
| z         | ... | zdvih                    | [m]                  |

|             |     |                                   |                                     |
|-------------|-----|-----------------------------------|-------------------------------------|
| $K_{Fe}$    | ... | činitel plnění průřezu železa     | [-]                                 |
| $\omega$    | ... | úhlová rychlost                   | [rad/s]                             |
| $N$         | ... | závity                            | [závit]                             |
| $n$         | ... | závit                             | [závit]                             |
| $s$         | ... | stoupání závitů                   | [m]                                 |
| $\delta$    | ... | vzduchová mezera                  | [m]                                 |
| $Y$         | ... | stlačení pružiny v plném zatížení | [m]                                 |
| $k_{AG}$    | ... | materiálová konstanta stříbra     | [-]                                 |
| $\theta$    | ... | oteplení                          | [K]                                 |
| $\vartheta$ | ... | teplota                           | [°C]                                |
| $\alpha$    | ... | chlazení                          | [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ] |
| $\lambda$   | ... | tepelná vodivost                  | [WK <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ] |
| $R_T$       | ... | tepelný odpor                     | [KW <sup>-1</sup> ]                 |
| $Q$         | ... | tepelný tok                       | [W]                                 |